



Escola Naval

Departamento de Formação de Engenheiros Navais - Ramo de Mecânica



TERMOGRAFIA COMO INSTRUMENTO DE MANUTENÇÃO CONDICIONADA NA MARINHA

25008 ASPOF EN-MEC Marcos Ahmad

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MILITARES
NAVAIS, ESPECIALIDADE EM ENGENHARIA NAVAL, RAMO DE
MECÂNICA

Junho de 2013



Escola Naval

Departamento de Formação de
Engenheiros Navais – Ramo Mecânica



TERMOGRAFIA COMO INSTRUMENTO DE MANUTENÇÃO CONDICIONADA NA MARINHA

Elaborado por:

ASPOF EN-MEC Marcos

Ahmad

Tutorado por:

Eng. Martins Vairinhos

Junho de 2013



Epígrafe.....



Agradecimentos

Por escrever.



Resumo

No âmbito da manutenção por acompanhamento de condição, a termografia é uma das ferramentas mais importantes. No entanto existe a necessidade de a aperfeiçoar às condições da Marinha Portuguesa, criando uma base de dados das imagens recolhidas pela câmara de imagem térmica e uma ferramenta de análise que torne de certa forma, independente da subjetividade humana. Este trabalho estuda a aplicação de métodos de recolha, como também métodos de arquivação das imagens térmicas, onde posteriormente inclui a realização de um programa de fácil interação que gere uma base de dados criado em Microsoft Access 2013™, com acesso a um GUI (Graphic User Interface) em suporte Embarcadero RAD Studio XE3™. Cujo objetivo é tornar a análise termográfica prática, possibilitando assim um fácil acompanhamento de condição dos equipamentos.

Palavras-chave: Por escrever.



Abstract

In the field of predictive maintenance, thermography is one of the most important tools for monitoring the condition of equipment. Although, there is a need to improve it, and adapt it to the conditions of the Portuguese Navy, building a database for images taken from a thermal imaging camera and creating an analysis tool somehow independent of human opinion and subjectivity. This work studies a method to extract the thermal images, and store these images accordingly. Finally, this work includes the creation of a Microsoft Access 2013™ database with a GUI (Graphic User Interface) supported by an Embarcadero RAD Studio XE3™ software. With the objective of making the thermographic analysis a practical process, allowing condition monitoring of equipment an easy task.

Keywords: Working on it.



Índice

1	Lista de Figuras	9
2	Lista de Tabelas.....	13
3	Lista de Abreviaturas e Símbolos.....	14
4	Objetivo.....	15
5	Introdução.....	15
	3.1 Definição do problema.....	15
	3.2 Importância do estudo.....	16
	3.3 Estrutura do Trabalho	16
	3.3 Termografia e a Marinha de Guerra Portuguesa.....	17
6	Enquadramento Teórico	18
	4.1 Nota Histórica	18
	4.2 Teoria da Termografia	21
	4.2.1 Espectro eletromagnético	21
	4.2.2 Corpo Negro.....	22
	4.2.3 Corpos Reais	25
	4.2.4 Emissividade dos corpos	26
	4.2.5 Termodinâmica.....	31
	4.2.6 Transferência de calor	31
	4.3 Termografia no âmbito da manutenção	32
	4.3.1 Aplicação da termografia em instalações elétricas	35
	4.3.2 Anomalias associadas a Sistemas Elétricos	36
	4.3.3 Técnicas de melhoramento de ensaios termográficos	38
	4.3.4 Métodos de medição e análise termográfica	40
	4.3.5 Sistema de Diagnóstico Aplicando a Termografia.....	42
7	Metodologia	44
	5.1 Ensaio Termográfico.....	44
	5.2 Base de Dados.....	47



5.3. Análise dos Dados	48
5.3.1 Teste de Kolmogorov-Smirnov	49
5.3.2 Regressão Linear e Correlação.....	50
5.4 Programa Desenvolvido.....	52
5.4.1 Formulários	53
5.5 Resumo da Metodologia Desenvolvida	68
8 Recolha e Análise de Dados.....	69
9 Resultados do Estudo e Validação	70
10 Discussão	71
11 Conclusões.....	72
12 Trabalhos Futuros	73
13 Bibliografia.....	74



1 Lista de Figuras

Figura 1. Sir William Herschel (1738-1822). Fonte: (FLIR Systems, 2010).....	19
Figura 2. Experiência de Sir Herschel utilizando o prisma de Newton. Fonte: (Sir William Herschel Society, 2000).	20
Figura 3. Espectro eletromagnético. 1: Raios-X; 2: Ultravioleta; 3: Espectro visível; 4: Infravermelhos; 5: Micro-ondas; 6: Ondas Rádio. Fonte: (FLIR Systems, 2010)..	21
Figura 4. Modelo de Corpo Negro. Fonte: (Vasconcellos, 2006)	22
Figura 5. Radiância espectral emitido por um corpo negro a várias temperaturas absolutas segundo a Lei de Planck. 1: Radiância espectral emitida [$W/cm^2 \times 10^3(\mu m)$]; 2: Comprimento de onda (μm). Fonte: (FLIR Systems, 2010).	24
Figura 6. Emissividade do Cobre (1), Ferro (2), Alumínio (3) e prata (4). Fonte: (Barreira, 2004).	26
Figura 7. Emissividade da Água (1), Terra (2) e Plástico (3). Fonte: (Barreira, 2004)..	26
Figura 8. Emissividade a vários ângulos de observação para Madeira (1), Papel (2) e Vidro (3). Fonte: (Barreira, 2004).	27
Figura 9. Emissividade para vários ângulos de observação Níquel Polido (1), Níquel Baço, Crômio (3) e Alumínio (4). Fonte: (Barreira, 2004).	27
Figura 10. Variação da Emissividade com o aumento de temperatura para Níquel (1), Tungstênio (2) e Platina (3). Fonte: (Barreira, 2004).	28
Figura 11. Variação da Emissividade com a temperatura para Borracha (1), Porcelana (2), Cortiça (3), Papel (4), Argila Refratária. Fonte: (Barreira, 2004).	28
Figura 12. Corpo a temperatura uniforme apresenta três diferentes temperaturas, devido às diferentes emissividades dos materiais constituintes. Fonte: (Santana, 2008). ..	29
Figura 13. Corpo cilíndrico a uma temperatura uniforme, composto pelo mesmo material, onde se observa diferentes padrões térmicos devido à alteração de emissividades. Fonte: (Santana, 2008).	29
Figura 14. Variação da Emissividade o Cobre por Oxidação sendo, Bastante Oxidado (1), Levemente Oxidado (2), Polido (3). Fonte: (Barreira, 2004).	30
Figura 15. Modos de Transferência de calor, 1: Condução; 2: Convecção; 3: Radiação. Fonte: (Incropera & DeWitt, 1996).	31
Figura 16. Exemplos da termografia Aplicada a Sistemas Elétricos. Fonte: (Gonçalves, 2011)	36



Figura 17. Contacto oxidada de um pequeno disjuntor, do lado direito sua imagem térmica correspondente. Fonte: (Epperly, Heberlein, & Eads, 1997).	37
Figura 18. Típico padrão térmico apresentado em disjuntores em sobrecarga. Fonte: (Jadin & Taib, 2012).	37
Figura 19. Padrão térmico de desequilíbrio de carga numa das fases. Fonte: (Jadin & Taib, 2012).	38
Figura 20. Técnica de extração dos valores de temperatura da imagem (a) Temperaturas encontradas ao longo da linha 1 (b). Aplicando os dois métodos de análise teríamos, para uma análise qualitativa: $\Delta T = T3 - T1$; Quanto à análise quantitativa, o cálculo seria o seguinte: $\Delta T = T3 - T_{ambiente}$. Fonte: (Lindquist, Bertling, & Eriksson, 2005).	42
Figura 21. Fases inerentes a um sistema de diagnóstico utilizando a técnica de termografia. Adaptado de: (Jadin & Taib, 2012).	43
Figura 22. Exemplo de uma FIT para ensaios termográficos.....	45
Figura 23. Interface do programa “FLIR QuickReport 1.2” apresentando um termograma do quadro principal do N.R.P Baptista de Andrade, apontando aos aspetos importantes a inserir.	46
Figura 24. Tabela principal da base de dados, Microsoft Access 2013™.....	47
Figura 25. Fases do Quadro Elétrico Principal do N.R.P Baptista de Andrade, apresentando a temperatura mínima, máxima e média por baixo da imagem térmica.....	48
Figura 26. Interface inicial do programa, porta de acesso dos vários formulários na aplicação.....	53
Figura 27. Formulário Consulta.	54
Figura 28. Funcionalidade do formulário consulta para filtrar resultados.	55
Figura 29. Separador Nova Entrada.	56
Figura 30. Imagem retirada diretamente da CIT, apresentando uma resolução de 240x240.....	56
Figura 31. Botões encontrados no separador Nova Entrada, o botão à esquerda lança internamente o programa FLIR QuickReport 1.2. O botão que é apresentado à direita abre um OpenFileDialog, por forma ao utilizador procurar a imagem que pretende guardar.....	57
Figura 32. Botão guardar nova entrada.	57



Figura 33. Formulário Estudar Imagem.	58
Figura 34. Tabela do formulário Estudar Imagens, apresentando todos os valores de temperatura da imagem em análise.	58
Figura 35. Pesquisa da base de dados no formulário Estudar Imagens.	59
Figura 36. Botões para mostrar os respetivos gráficos no formulário Estudar Imagens.	59
Figura 37. Gráficos Distribuição de temperaturas e distribuição cumulativa de uma dada imagem térmica no formulário Estudar Imagens. Estes gráficos também contemplam uma função zoom, para melhor observação dos valores.	59
Figura 38. Botões para operações de segmentação de imagem do formulário Estudar Imagens.	60
Figura 39. Formulário Comparar Imagens.	61
Figura 40. Imagens do mesmo equipamento, segmentadas exatamente na mesma região.	61
Figura 41. Painel no formulário “Comparar Imagens” que dá ao utilizador a média de cada região segmentada.	62
Figura 42. Gráficos distribuição de temperaturas de duas imagens segmentadas.	62
Figura 43. Teste Kolmogorov-Smirnov para duas amostras.	63
Figura 44. Resultado na aplicação do teste KS para duas amostras.	64
Figura 45. Separador “Tendências”.	65
Figura 46. Botão no formulário “Tendências”, irá disponibilizar um painel de filtragem de resultados.	65
Figura 47. Painel de filtragem de resultados, semelhante aos formulários anteriores.	65
Figura 48. O botão à direita ordena as imagens por data mais recente, o botão à esquerda carrega as imagens para os vários componentes de imagens prontos a receber. A caixa no centro da figura corresponde a quantas imagens resultaram da filtragem que o utilizador inseriu.	66
Figura 49. Botão que proporciona ao utilizador toda a informação tendencial das imagens em análise.	66
Figura 50. Gráfico tendência da região selecionada, disponibiliza a reta das variações na média de temperaturas da região (eixo dos y) ao longo do tempo (eixo dos x), bem como a reta de regressão e a respetiva função característica para as amostras.	67



Figura 51. Painei no formulário “Tendências” que apresenta as várias regiões segmentadas das imagens, bem como a informação da média dessas mesmas regiões. 67



2 Lista de Tabelas

Tabela 1. Variáveis e valores associados apresentadas na lei de Planck (Incropera & DeWitt, 1996).....	23
Tabela 2. Esquema utilizado na análise qualitativa, segunda coluna. Como também na análise quantitativa, correspondente na terceira coluna (Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment, Infrasppection Institute, 2008)	41
Tabela 3. Variáveis referentes às equações 8, 9, 10 e 11.	51



3 Lista de Abreviaturas e Símbolos

ADO – ActiveX Data Objects.

BDIT – Base de Dados de Imagens Térmicas.

CGAV – Gabinete de Avaliação de Condição.

CIT – Câmara de Imagem Térmica.

EN-MEC – Engenheiros Navais, Ramo de Mecânica.

FIT – Ficha de Trabalho.

GUI – Graphic User Interface.

KS – Kolmogorov-Smirnov.

MGP – Marinha de Guerra Portuguesa.

N.R.P – Navio da República Portuguesa.

SAAIT – Sistema de Armazenamento e Análise de Imagens Térmicas.

SMP – Sistema de Manutenção Planeada.

Símbolos:

Em produção.



4 Objetivo

Este estudo visa a desenvolver uma metodologia de recolha de imagens térmicas, bem como uma gestão de uma base de dados onde estão guardadas. Adaptando uma ferramenta que permita aos utilizadores diagnosticar avarias, utilizando imagens térmicas retiradas em instantes distintos, aplicando uma correta metodologia estatística, por forma a decidir se houve ou não alterações significativas nos equipamentos.

5 Introdução

Aplicando a técnica da termografia, este estudo processa o diagnóstico de avarias com recurso a comparação de gráficos de temperatura, aplicando o teste de kolmogorov-smirnov. Este projeto encontra-se então inserido nas áreas de Gestão da Manutenção e Diagnóstico de Avarias. A importância deste projeto surge pela necessidade de melhorar o tratamento e interpretação dos dados obtidos pelas atuais técnicas de acompanhamento de condição, neste caso específico, pela termografia.

5.1 Definição do problema

De modo a usar a termografia como técnica de acompanhamento de condição dos equipamentos, é necessário por parte dos técnicos envolvidos, uma formação consolidada e alguma experiência por forma a ter capacidades de retirar algum proveito da ação de manutenção. A termografia encontra-se dependente de duas vertentes, da experiência e da subjetividade humana, pois durante um ensaio termográfico o utilizador depende da sua formação e na preocupação em retirar uma imagem com os parâmetros adequados e relevantes. Por outro lado, a análise aos termogramas retirados, o utilizador necessita de uma ferramenta de avaliação que não dependa da subjetividade humana, caso contrário a avaliação pode não ser considerada a adequada.

Assim, o desenvolvimento desta investigação passa pela análise estatística de imagens térmicas captadas por uma câmara que consegue ir além do olho humano,



identificando as temperaturas dos objetos. Estas imagens representam a temperatura superficial de um dado equipamento que irá ser analisado. As imagens térmicas são a base de uma análise cujo objetivo é saber se um determinado equipamento estará a funcionar no seu estado considerado “normal”, ou se apresenta alguma anomalia. Neste caso evidenciada por uma alteração na sua assinatura térmica superficial, sem que dependa exclusivamente da experiência do utilizador.

5.2 Importância do estudo

A importância deste estudo encontra-se inserido no âmbito da manutenção acompanhada de equipamentos elétricos que tenham uma importância relevante. Desta forma se um diagnóstico adequado for possível, poderemos ter conhecimento do estado do equipamento, que permitirá prever avarias de forma mais eficaz, evitando problemas de elevada complexidade, sem que tal esteja inteiramente dependente da subjetividade e experiência do operador.

Assim, a dissertação pretende responder às seguintes questões:

- Como proceder a um ensaio termográfico, e de que forma arquivar a imagem, atendendo a todas as variáveis que influenciam a amostra?
- É possível a implementação de uma ferramenta com uma adequada metodologia estatística que permita ao utilizador diagnosticar avarias, determinando se houve ou não alteração do estado de funcionamento de um equipamento?

5.3 Estrutura do Trabalho

Em produção.



5.4 Termografia e a Marinha de Guerra Portuguesa

A manutenção por acompanhamento de condição na MGP usando a técnica de termografia não se encontra bem vinculada. Não existindo a bordo uma CIT, os técnicos não poderão fazer as devidas inspeções termográficas, pelo que estas terão de ser solicitadas pelo navio quando se encontram atracados.

As inspeções são realizadas pela Direção de Navios¹, unidade onde se encontra o CGAV (Gabinete de Avaliação de Condição), os ensaios são conduzidos por um oficial e sargento que guarnecem este setor. Os dois encarregados deslocam-se à unidade, neste caso navios que previamente fazem uma requisição para uma análise termográfica aos equipamentos que constam nessa mesma requisição. Os homens do CGAV têm em sua posse uma CIT, recolhem os dados termográficos e elaboram um relatório com o auxílio do *software* disponibilizado pela companhia da CIT – “FLIR QuickReport”. Apesar do *software* disponibilizar inúmeras funcionalidades, desde análise, conversão em Microsoft Excel para análise de temperatura *pixel a pixel* (aglutinação de Picture e Element), elaboração de relatórios. Há que realçar que estas funcionalidades não retiram de modo algum a subjetividade inerente a uma inspeção e análise termográfica. Desta forma, o fator “experiência do operador” não é desprezável.

Sendo o objetivo deste trabalho uma correta comparação de imagens obtidas ao longo do tempo, tentando definir se houve alterações significativas do estado de funcionamento de um dado equipamento, através da aplicação de um sistema de análise que permita descobrir essas alterações. Portanto, o que importa realçar é a tentativa deste trabalho otimizar o processamento de dados, por forma a minimizar o fator humano, ou seja, “experiência do operador”.

Como o que se pretende da aplicação da análise de imagens nos termogramas é a obtenção de um acompanhamento de condição eficiente e adequado às condições da MGP, que permita detetar uma alteração do estado de funcionamento, ou seja, não apenas monitorizar os equipamentos e deduzir no local possíveis conclusões sobre o estado de funcionamento. Objetivando para um problema que assenta numa vertente passiva, por outras palavras, através da recolha contínua de dados de equipamentos em operação. De uma forma científica e objetiva, a análise terá de ser passível de ser

¹ Unidade da Marinha Portuguesa responsável pela condução de ações de reparação e manutenção (caso não possa ser feito pela guarnição) dos Meios Navais.



realizada pelo oficial responsável pelos equipamentos que justifiquem um acompanhamento de condição. Os dados recolhidos (por exemplo, semanalmente ou mensalmente) terão que ser introduzidos no computador, criando uma nova entrada na base de dados (*upload*). O objetivo é que o *software* implementado determine se o equipamento continua a operar da mesma forma, ou se eventualmente existe alguma alteração significativa. Assim, o oficial responsável tem uma ferramenta útil na determinação de possíveis alterações de estados dos equipamentos, desta forma prevendo se existe risco de avaria num futuro próximo.

6 Enquadramento Teórico

Sendo a termografia um tema relativamente atual, o presente capítulo tem como objetivo fazer um resumo bibliográfico desta técnica de análise não destrutiva, com o cuidado de a enquadrar com as respetivas especificidades que se encontra na MGP.

Começando por retirar uma nota histórica do tema, em seguida efetuar uma preparação teórica, abordando conceitos inerentes aos aspetos físicos da técnica de termografia. Enquadrando este método de análise no SMP (Sistema de Manutenção Planeada) em vigor na MGP, passando também por falar no vasto leque de aplicabilidade nos diferentes ramos, mais concretamente na análise de equipamentos elétricos (âmbito no qual este estuda se insere). Explorando um correto levantamento termográfico, bem como algumas falhas comuns encontradas em equipamentos elétricos. Conseguindo assim, um elo de ligação com o capítulo seguinte que aborda a comparação de imagens térmicas.

6.1 Nota Histórica

Antes do ano de 1801, a existência da banda de ondas infravermelhos do espectro eletromagnético ainda era desconhecida. Foi precisamente neste ano que Sir William Herschel revelou ao mundo a existência desta banda “térmica”.

Sir William Herschel – Astrónomo ao serviço do Rei George III de Inglaterra –, já era bastante famoso no mundo da ciência pela descoberta do planeta Úrano. Esta grande descoberta de Herschel foi accidental. Ocorreu durante a pesquisa de um novo

objeto ótico. Nesta altura, o astrónomo Sir Herschel encontrava-se em busca de um novo filtro ótico com a capacidade de reduzir o brilho no interior de um telescópio de modo a obter melhores observações do sol. Enquanto testava diferentes amostras de óticas de várias cores, estas evidenciaram numa redução de brilho semelhantes. Herschel ficou curioso ao descobrir que algumas amostras passavam pouco calor proveniente do sol, enquanto outras passavam num nível tão elevado que arriscava danificar os olhos apenas com alguns segundos de observação (FLIR Systems, 2010).



Figura 1. Sir William Herschel (1738-1822). Fonte: (FLIR Systems, 2010)

Como objetivo de encontrar o material adequado às suas necessidades, Herschel montou o tão famoso Prisma de Newton² e efetuou a experiência apenas para verificar os aspetos térmicos e não o aspeto visual da distribuição das cores e intensidade do espectro. Começou por pintar com tinta preta o bolbo de um termómetro de mercúrio, com este detetor de radiação improvisado procedeu aos testes de calor, utilizando o prisma para projetar as várias cores do espectro visível. Ao deslocar o bolbo pelas várias cores, verificou que a temperatura máxima encontrava-se na zona preta, no final da cor vermelha do espectro. Herschel era então o primeiro a descobrir a banda das ondas infravermelhas, batizando-a como “Espectro termométrico” (FLIR Systems, 2010).

Muitos anos depois da grande descoberta de Sir Herschel é que encontramos os princípios da termografia como a conhecemos hoje. Foi apenas na década de 60 que esta ciência se encontrou disponível no mundo civil, com grande impacto na utilização industrial, após vários anos de desenvolvimento militar e muito secretismo à sua volta.

² Experiência publicada em 1675 por Sir Isaac Newton, onde verifica que todas as cores encontram-se presentes na luz branca.

A termografia é hoje uma ciência de aquisição e análise de informações térmicas a partir de um equipamento de obtenção de imagens infravermelhos (neste caso CIT). Estas imagens, denominadas por termogramas permitem a visualização da distribuição de temperatura da superfície focalizada. Sendo a termografia uma ferramenta de manutenção preditiva, esta pode ser usada para monitorizar condições dos equipamentos, estruturas e sistemas. Tem o objetivo de medir energia emitida do espectro infravermelho, o que significa a extensão do conceito da visão humana. Constituindo esta, uma faixa de frequência eletromagnética naturalmente emitida por um corpo ou objeto, traduzindo-se em temperatura. Conseguindo desta forma determinar as condições de operação do equipamento (no caso da manutenção). Detetando estas anomalias térmicas (áreas que se encontram mais quentes ou mais frias que o normal), um operador de uma CIT pode localizar e definir potenciais problemas em sistemas ou equipamentos (Mobley, 2002).



Figura 2. Experiência de Sir Herschel utilizando o prisma de Newton. Fonte: (Sir William Herschel Society, 2000).

6.2 Teoria da Termografia

Por forma a entender o vasto mundo da termografia é necessário algumas bases em temáticas, como o eletromagnetismo, termodinâmica e transmissão de calor. O presente capítulo remete exatamente para estes aspetos, de alguma forma simplificados e pouco aprofundados.

6.2.1 Espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético encontra-se dividido em gamas de ondas, designadas por bandas. Estas bandas distinguem-se fundamentalmente pelos seus comprimentos de onda. Neste caso a termografia remete-nos para o espectro da banda de infravermelhos. Como podemos observar na figura 3, o seu limite inferior ($0,75\ \mu\text{m}$) remete-nos ao espectro visível, onde se apresenta como vermelho muito escuro. No seu limite superior ele encontra a banda das micro-ondas (FLIR Systems, 2010).

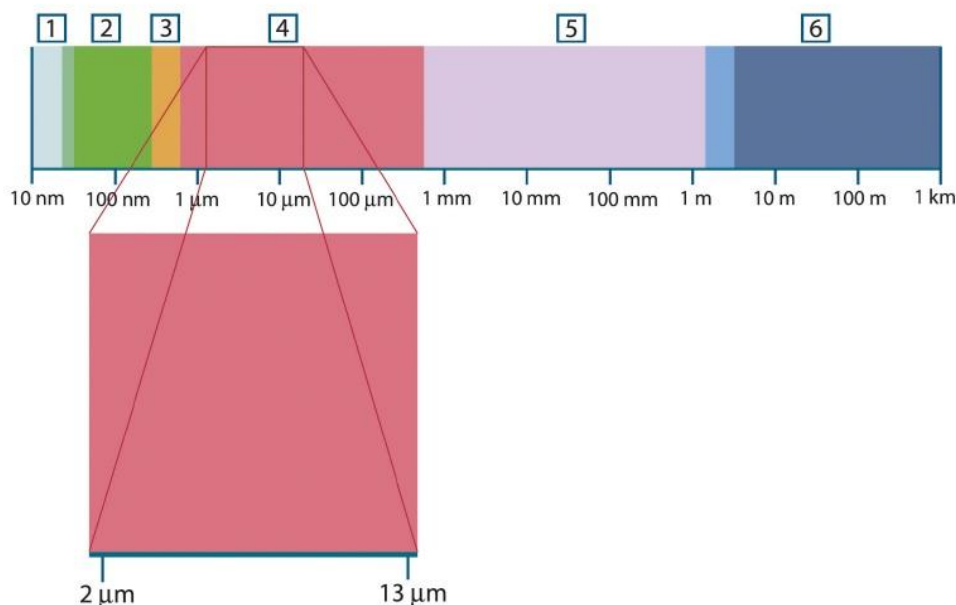


Figura 3. Espectro eletromagnético. 1: Raios-X; 2: Ultravioleta; 3: Espectro visível; 4: Infravermelhos; 5: Micro-ondas; 6: Ondas Rádio. Fonte: (FLIR Systems, 2010).

6.2.2 Corpo Negro

O corpo negro é definido como um corpo ideal com a capacidade de absorver toda a radiação incidente sobre ele, com a condição que no equilíbrio térmico, as taxas de emissão e absorção deste corpo são exatamente iguais. Este processo foi provado pela Lei Kirchhoff da radiação térmica (Gustav Robert Kirchhoff), que menciona que um corpo capaz de absorver toda a radiação em qualquer banda, é igualmente capaz na emissão da radiação (Incropera & DeWitt, 1996).

O modelo prático mais simples de um corpo negro é o de uma pequena abertura num objeto oco, cujas paredes são mantidas a uma temperatura uniforme. Na Figura 4, pode observar-se um esboço do dito modelo, em que as setas representam a entrada da radiação no corpo através de um pequeno orifício. Uma vez no seu interior, as radiações são absorvidas e refletidas inúmeras vezes pelas paredes do objeto. Desta forma, qualquer radiação que entra vai sendo refletida e absorvida nas paredes e acabando por ser completamente absorvida. Por conseguinte, qualquer radiação que possa tornar a sair para o meio, pela única ligação possível que é o orifício, representa apenas uma pequena porção quando comparada com a quantidade que foi absorvida (Incropera & DeWitt, 1996).

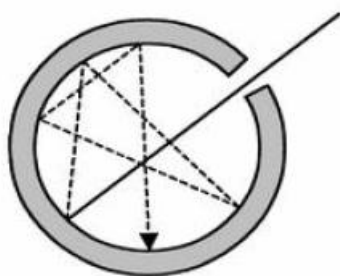


Figura 4. Modelo de Corpo Negro. Fonte: (Vasconcellos, 2006)



A radiância espectral ou poder emissivo por unidade de superfície e comprimento de onda de um corpo negro é traduzido pela Lei de Planck, equação 1 (Incropera & DeWitt, 1996):

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \times 10^{-6} \left[\frac{Watt}{m^2}, \mu m \right] \quad (1)$$

$W_{\lambda b}$	A radiância espectral de um corpo negro num comprimento de onda λ
c	Velocidade da luz = 3×10^8 [m/s]
h	Constante de Planck = $6,6 \times 10^{-34}$ [J. s]
k	Constante de Boltzmann = $1,380662 \times 10^{-23}$ [J/K]
T	Temperatura absoluta de um corpo negro [K]
λ	Comprimento de onda [μm]

Tabela 1. Variáveis e valores associados apresentadas na lei de Planck. Fonte: (Incropera & DeWitt, 1996).

Pela equação acima descrita podemos compreender que a radiância espectral não só depende da temperatura, como também do comprimento de onda. Esta equação quando produzida para a forma gráfica produz uma família de curvas, onde a emissão espectral é zero quando $\lambda=0$, tendo depois um crescimento acentuado até λ_{max} , coincidindo com a radiação espectral máxima. Após este valor o gráfico tenderá para zero continuando para comprimentos de onda muito elevados. Sendo assim, à medida que a temperatura vai diminuindo, o pico da curva vai-se deslocando, aumentando o comprimento de onda e diminuindo a radiância espectral.

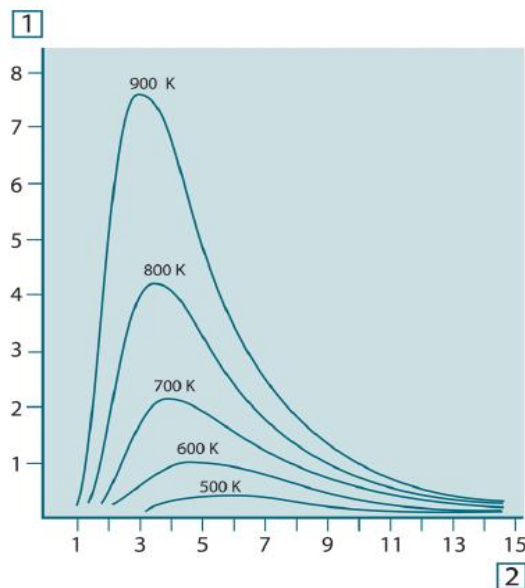


Figura 5. Radiação espectral emitida por um corpo negro a várias temperaturas absolutas segundo a Lei de Planck. **1:** Radiação espectral emitida [$W/cm^2 \times 10^3(\mu m)$]; **2:** Comprimento de onda (μm). Fonte: (FLIR Systems, 2010).

Os resultados obtidos por Max Planck derivam da manipulação da Lei de Wien (Wilhelm Wien) e da Lei de Stefan-Boltzmann (Josef Stefan e Ludwig Boltzmann). A Lei de Wien estabelece uma proporcionalidade inversa entre comprimento de onda e emissão máxima da temperatura absoluta do corpo. Esta pode ser obtida através da derivação da Lei de Planck em relação ao comprimento de onda pela equação 2 (FLIR Systems, 2010):

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2898}{T} [\mu m] \quad (2)$$

Pela integração da fórmula de Planck (de $\lambda = 0$ a $\lambda = \infty$) obtemos a radiação total emitida (W_b) por um corpo negro, por conseguinte a fórmula de Stefan-Boltzmann, equação 3 (Incropera & DeWitt, 1996):

$$W_b = \sigma T^4 [Watt/m^2] \quad (3)$$

Onde:

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [Watt/m^2 \cdot K^4]$ – Constante de Stefan-Boltzmann



6.2.3 Corpos Reais

Retomando agora o estudo para corpos que normalmente não apresentam as leis anteriormente descritas, sendo estes corpos reais. Existem três processos que podem ocorrer que previnem que um dado objeto se comporte como um corpo negro. Nem toda a radiação é absorvida (α), parte desta é refletida (ρ) ou transmitida (τ). A soma destes três fatores é sempre um para qualquer comprimento de onda (λ), temos então a seguinte relação na equação 4 (Barreira, 2004):

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (4)$$

Segunda a Lei de Kirchhoff da radiação térmica, onde um corpo exposto a uma determinada temperatura e comprimento de onda, apresenta valores de emissividade (ε) iguais aos valores de absorção (α), onde por fim chegamos à equação 5 (Barreira, 2004):

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (5)$$

Por conseguinte, surge o importante conceito de emissividade, definido como a razão entre a energia emitida por um corpo real e a energia emitida por um corpo negro à mesma temperatura. Chegamos então a uma importante conclusão, que a emissividade de um corpo negro é igual a um e a emissividade de um espelho perfeito é zero. O valor da emissividade para um corpo real é calculado através da Lei de Stefan-Boltzmann da equação 3, mas com uma pequena alteração expressa na equação 6 (Incropera & DeWitt, 1996):

$$E = \sigma \varepsilon T^4 \text{ [Watt/m}^2\text{]} \quad (6)$$

6.2.4 Emissividade dos corpos

O valor da emissividade influencia bastante a leitura das temperaturas por parte das CIT, quanto menor for a emissividade de um objeto, maior serão os erros na leitura. A emissividade de um objeto varia principalmente com o tipo de material, o ângulo de observação, a geometria do corpo, o estado da superfície, o comprimento de onda e a temperatura (Gasperic, Sprajcar, Bernard, & Glavic, 2007) .

Comprimento de onda

A figura 6 representa a variação da emissividade com o comprimento de onda em metais e a figura 7 em não metais. Há que salientar que os metais variam de uniformemente, diminuindo a sua emissividade com o aumento do comprimento de onda, enquanto nos não-metais a situação é inversa.

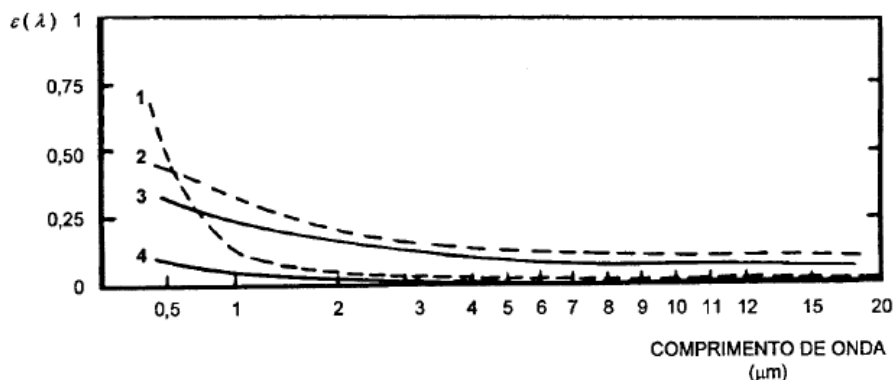


Figura 6. Emissividade do Cobre (1), Ferro (2), Alumínio (3) e prata (4). Fonte: (Barreira, 2004).

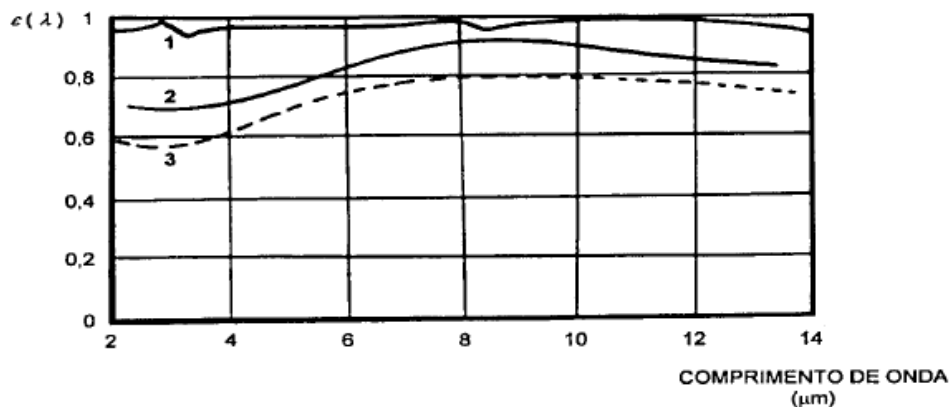


Figura 7. Emissividade da Água (1), Terra (2) e Plástico (3). Fonte: (Barreira, 2004).

Ângulo de Observação

A variação do ângulo de observação pode originar erros na leitura da emissividade. No caso de superfícies não planas, o resultado deste fenómeno tem o nome de emissividade aparente.

No caso dos não metais, figura 8, este fenómeno quase não se faz sentir, sendo mesmo para ângulos de observação entre 0° e os 60° em relação à perpendicular da superfície, no entanto para além dos 70° apresenta uma descida repentina até chegar ao valor de zero.

Nos metais, figura 9, podemos observar que a emissividade mantém-se constante para pequenos ângulos, tal não acontece a partir dos 40° sofrendo este, um aumento brusco para ângulos superiores.

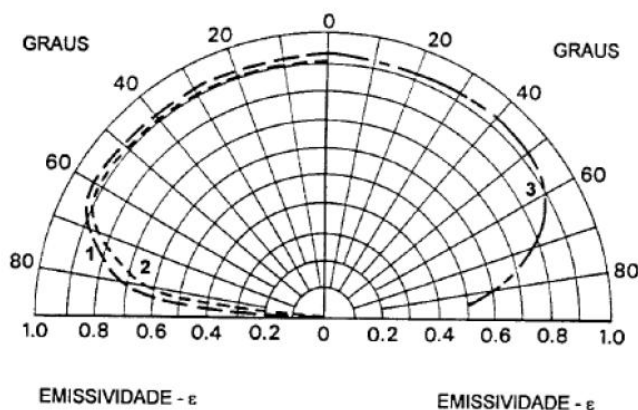


Figura 8. Emissividade a vários ângulos de observação para Madeira (1), Papel (2) e Vidro (3).

Fonte: (Barreira, 2004).

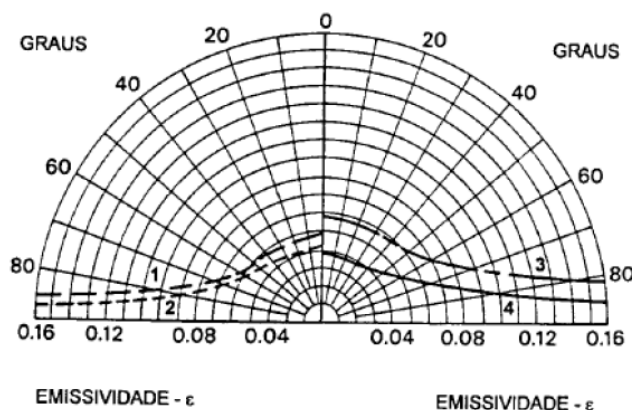


Figura 9. Emissividade para vários ângulos de observação Níquel Polido (1), Níquel Baço, Crómio (3) e Alumínio (4). Fonte: (Barreira, 2004).

Temperatura

Existem diferenças de emissividade para materiais a diferentes temperaturas, no que respeita aos metais, figura 10, a emissividade aumenta uniformemente com o aumento da temperatura. No que respeita aos não metais, figura 11, existe a diminuição da emissividade de forma brusca e irregular.

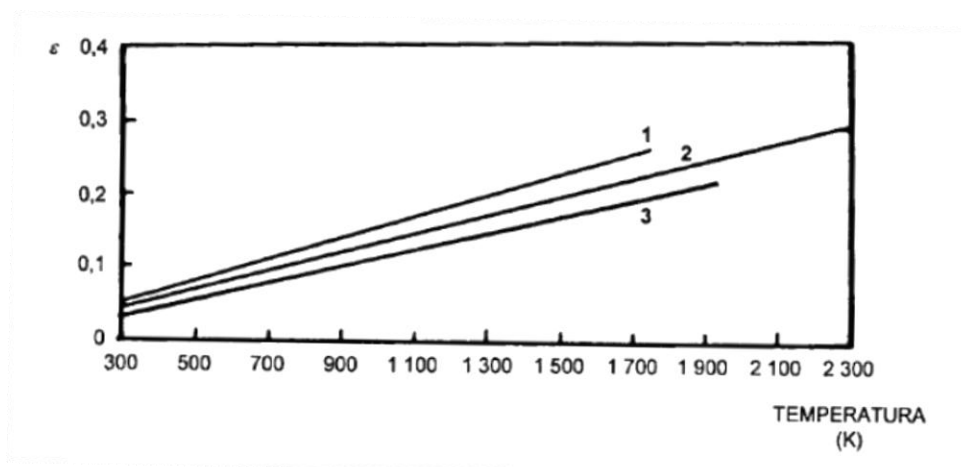


Figura 10. Variação da Emissividade com o aumento de temperatura para Níquel (1), Tungsténio (2) e Platina (3). Fonte: (Barreira, 2004).

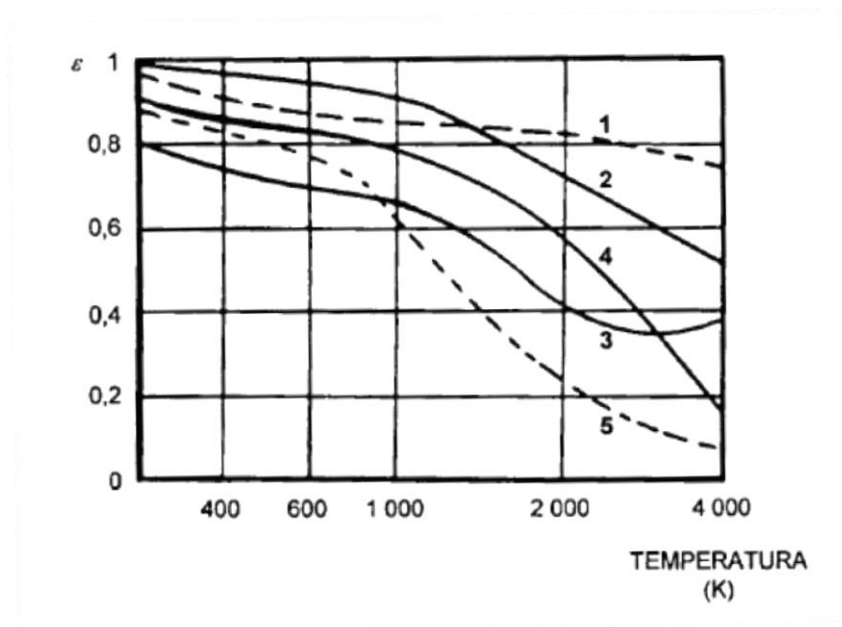


Figura 11. Variação da Emissividade com a temperatura para Borracha (1), Porcelana (2), Cortiça (3), Papel (4), Argila Refratária. Fonte: (Barreira, 2004).

Tipo de Material

Como representado na figura 12, um objeto com uma temperatura uniforme, constituído por três diferentes materiais, apresenta diferentes padrões térmicos devido à alteração da emissividade da superfície.

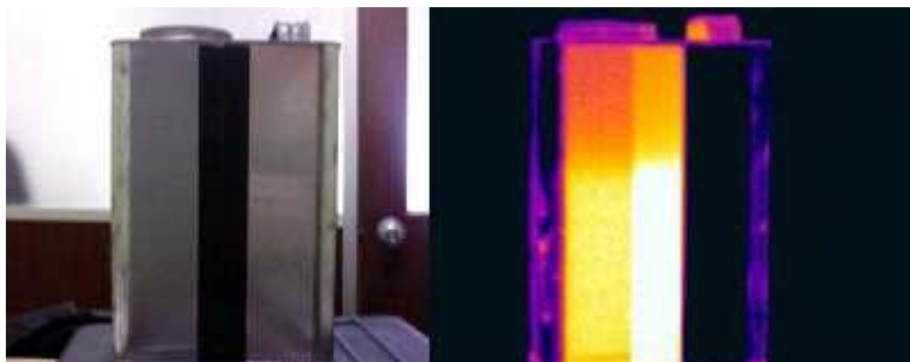


Figura 12. Corpo a temperatura uniforme apresenta três diferentes temperaturas, devido às diferentes emissividades dos materiais constituintes. Fonte: (Santana, 2008).

Geometria do Corpo

Podemos observar na figura 13, a geometria de um objeto influencia a emissividade, neste corpo a temperatura é uniforme e o material é o mesmo. Mas como podemos verificar, na zona convexa o objeto demonstra um padrão térmico superior ao observado na superfície plana. Tal fenómeno acontece devido ao baixo valor de emissividade na zona convexa, pois irá conduzir a um maior erro na leitura da temperatura.

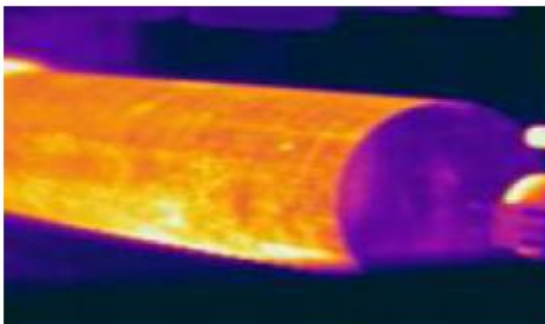


Figura 13. Corpo cilíndrico a uma temperatura uniforme, composto pelo mesmo material, onde se observa diferentes padrões térmicos devido à alteração de emissividades. Fonte: (Santana, 2008).

Estado da Superfície

A condição de superfície de um objeto é bastante importante, caso esta se encontre gasta, pintada ou oxidada, irá influenciar os valores de emissividade do corpo em observação, como demonstra a figura 14 abaixo esquematizada.

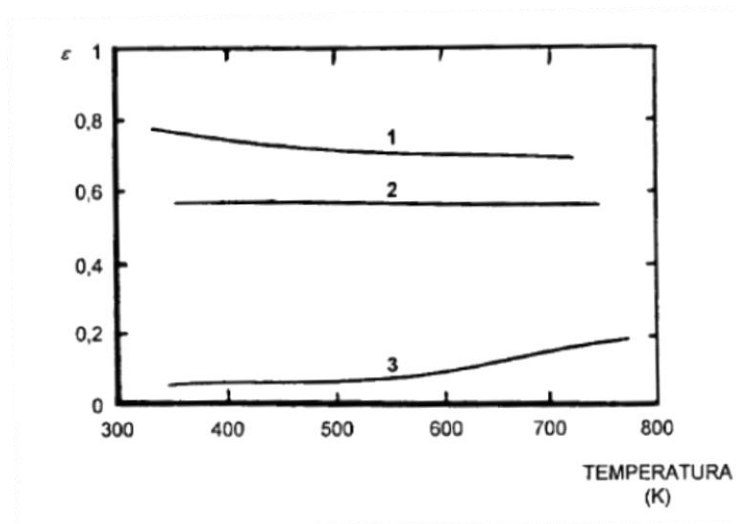


Figura 14. Variação da Emissividade do Cobre por Oxidação sendo, Bastante Oxidado (1), Levemente Oxidado (2), Polido (3). Fonte: (Barreira, 2004).

A FLIR (2010) apresenta dois métodos para encontrar o valor da emissividade de um objeto, quando não se tem acesso a um valor pré-determinado. No entanto, para que estes métodos sejam eficazes, a temperatura do mensurado não deve ser muito próxima da temperatura ambiente e ou refletida. Passamos a descrever os dois métodos.

Utilização de par termoeletrico: Seleciona-se um ponto de referência e mede-se a respectiva temperatura utilizando um par termoeletrico. Em seguida é alterada a emissividade até que a temperatura registada na CIT esteja em conformidade com a leitura do par termoeletrico (FLIR Systems, 2010).

Utilização de emissividade de referência: Neste método coloca-se um material de emissividade conhecida (fita, tinta, madeira, etc.) sobre o desconhecido. Posteriormente, medem-se as temperaturas com a CIT e altera-se a emissividade até que ambas temperaturas coincidam (FLIR Systems, 2010).

6.2.5 Termodinâmica

De forma a aprofundar o estudo da termografia, há que ter em conta os aspetos da Termodinâmica inerentes aos conceitos da Transferência de calor. Sendo todo o tipo de conversão de calor, como qualquer conversão de energia governado pelas leis da termodinâmica (Çengel, 2005).

A primeira lei da termodinâmica, fruto da lei da conservação de energia, estabelece que a energia total transferida para um sistema é igual à variação da sua energia interna. Esta lei pode ser escrita de várias formas consoante o tipo de sistema a que se refere, sendo estes isolado³, fechado⁴ ou aberto⁵. A segunda lei estabelece que, o calor flui sempre do corpo de temperatura mais elevada para o de temperatura mais baixa. Por último, mas não menos importante, a terceira lei ou lei zero da termodinâmica define que, se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, então estes estarão em equilíbrio térmico entre si (Çengel, 2005).

6.2.6 Transferência de calor

A transferência pode ser expressa como a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura (segunda lei da termodinâmica). Assim, sempre que existe uma diferença de temperatura num determinado meio, ocorre uma transferência de calor. Este processo pode ocorrer de três formas diferentes, condução, convecção ou radiação, ver figura 15.

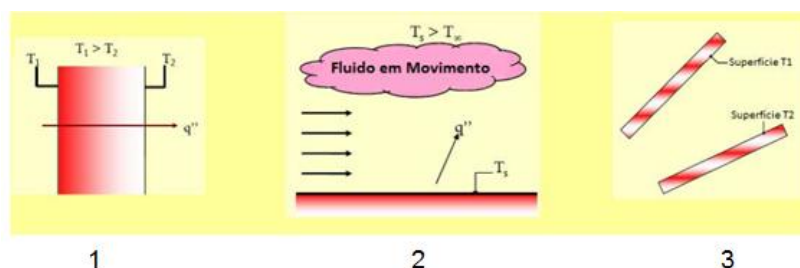


Figura 15. Modos de Transferência de calor, **1**: Condução; **2**: Convecção; **3**: Radiação. Fonte: (Incropera & DeWitt, 1996).

³ Sistema que não interage com a vizinhança, onde apenas poderá haver trocas de energia dentro do próprio sistema.

⁴ Sistema de massa fixa, havendo apenas troca de calor e trabalho com a vizinhança.

⁵ Sistema onde massa e calor podem sair e entrar no sistema.



- A condução é a transferência de energia entre dois objetos sólidos, por exemplo, uma barra de metal aquecida num extremo, se a fonte de calor se mantiver, eventualmente o calor chegará até ao lado oposto, com verificamos na figura 15.
- Convecção, sendo esta a transferência de calor entre líquidos e gases, normalmente associado a um processo de arrefecimento, desenvolvido na superfície dos corpos.
- Radiação é a transferência de calor por ondas eletromagnéticas, como já abordado anteriormente, esta é a forma de transferência que importa no estudo da termografia.

6.3 Termografia no âmbito da manutenção

A manutenção pode ser definida como: “A combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo supervisão, com a intenção de manter ou restaurar um equipamento/sistema a um estado que possa desempenhar as suas funções dentro dos parâmetros desejáveis” (Mobley, 2002). As possíveis políticas de manutenção, com vista a atingir um determinado objetivo (que em princípio será manter a operacionalidade, salvaguardar a segurança, minimizar custos, etc.) podem ser traduzidas, segundo o ILDINAV 802 (Marinha, 1998), nas seguintes:

Manutenção preventiva

Manutenção com objetivo de reduzir o risco de avaria, baseada quer nas especificações dos fabricantes, quer na análise do histórico do comportamento do material. É caracterizado pela necessidade de intervenções a executar ao longo do ciclo de vida, com vista a garantir um bom funcionamento dos equipamentos/sistemas, a estender a vida útil e diminuir possíveis riscos, quer de pessoal, quer na de segurança e operacionalidade dos navios. No âmbito da MGP estas intervenções são estabelecidas na forma de rotina, incluem desde verificações de funcionamento até mesmo à desmontagem de equipamentos/sistemas para revisão geral de todos ou parte dos seus órgãos e/ou componentes. A manutenção preventiva subdivide-se nas seguintes políticas de manutenção:



a) Manutenção preventiva sistemática

Conjunto de ações técnicas e administrativas a realizar sobre o material ao longo do seu ciclo de manutenção, de forma programada em função do tempo decorrido, número de horas de funcionamento ou da ocorrência de uma situação específica. Desta forma, as manutenções são controladas por um calendário onde os responsáveis têm a obrigação de cumprir, independentemente se o equipamento/sistema ou órgão realmente necessite de tal intervenção.

b) Manutenção preventiva por avaliação (ou condicionada)

Este tipo de manutenção consiste na utilização de meios de diagnósticos apropriados para o controlo de equipamentos, com a finalidade de adequar a execução das intervenções de manutenção ao estado real do material. Assegurando otimização de custos, mão-de-obra, sobresselentes, etc. Através desta política de manutenção procura-se atingir os seguintes objetivos:

- Reduzir, até onde for possível, ou até substituir as rotinas de maior duração e complexidade por intervenções de menor extensão e profundidade, tendo em atenção à redução dos custos de mão-de-obra, sobresselentes. Havendo desta forma uma redução no custo de manutenção do equipamento, aumentando assim a prestação de cada artigo até ao fim da sua vida útil.
- Possibilitar um controlo de qualidade constante sobre o estado real dos equipamentos/sistemas, através das indicações fornecidas pelas técnicas de diagnóstico.

Conforme já referido, a manutenção preventiva por avaliação baseia-se na aplicação de meios de diagnóstico, geralmente com os próprios equipamentos em funcionamento. Através das técnicas de diagnóstico, tentar-se-á identificar sintomas que denunciem a existência de anomalias num estado precoce de desenvolvimento. Dado à existência de uma grande diversidade de



equipamentos, órgãos e componentes que necessitam de ser controlados, verificando a multiplicidade dos sintomas possíveis de identificar, existe um variado leque de técnicas ou meios de diagnóstico. Desta forma, existe a necessidade da aplicação da técnica adequada ao controlo e às características dos equipamentos.

Entra as Técnicas existentes para a manutenção por acompanhamento de condição, surgem a análise de vibrações, ultrassons, análise de óleos, e o objeto em estudo, a termografia.

Manutenção corretiva

Após a discussão de um ramo de política de manutenção onde o objetivo é a prevenção, ou até mesmo previsão das avarias utilizando as técnicas previamente mencionadas, com vista a prolongar a vida útil dos equipamentos. Deparamo-nos agora com a sua política oposta da manutenção preventiva, esta recai numa política de manutenção accidental destinada a repor o material avariado num estado operacional especificado. Como a política anteriormente estudada, esta também subdivide-se nos seguintes:

a) Manutenção corrente ou normal

Manutenção corretiva referente à reparação de avarias que não afetam a segurança nem a operacionalidade dos meios (neste caso, meios navais), ou dos seus equipamentos/sistemas, cuja sua natureza permite que sejam executadas nos períodos destinados às ações de manutenção planeada.

b) Manutenção eventual

Manutenção corretiva referente a avarias que afetam a segurança e operacionalidade dos meios, equipamentos/sistemas. Ao contrário da anterior, não permite que sejam executadas sem interferência, determinando a uma passagem de situação de indisponibilidade, sendo neste caso a reparação efetuada fora do período da manutenção planeada.



c) Manutenção urgente

Trabalhos de manutenção corretiva referentes a avarias que afetam a segurança da operacionalidade dos meios, equipamentos/sistemas, e cuja natureza permite que sejam executados em curto espaço de tempo não interferindo com os planos de utilização.

d) Manutenção muito urgente

Pequenos trabalhos de manutenção corretiva referente a avarias que constituem um elevado nível de perigo imediato para o material e pessoal, cuja sua natureza permite que sejam executados imediatamente, não interferindo com o plano de utilização dos meios.

6.3.1 Aplicação da termografia em instalações elétricas

No campo das instalações elétricas, a termografia desempenha um papel de destaque no que diz respeito a inspeções e manutenção. Nesta área, uma das principais causas de avarias é o surgimento de falhas correspondentes ao aumento de temperatura. Devido a um elevado nível de precisão e sensibilidade da imagem, tem vindo a surgir muito interesse na aplicabilidade da termografia em equipamentos elétricos, consequentemente implementando sistemas que ajudem o utilizador na deteção de anomalias (Lizak & Kolcun, 2008).

Em qualquer circuito elétrico, um aumento da resistência significa um obstáculo à passagem de corrente, gerando calor, havendo aumento de temperatura. Este fenómeno tem o nome de efeito Joule, em homenagem ao físico inglês James Prescott Joule. O físico concluiu que a energia térmica dissipada num condutor quando percorrido por uma corrente elétrica é diretamente proporcional à resistência do condutor (R), ao quadrado da intensidade de corrente (I^2), como também o tempo durante a qual essa corrente passa (ΔT), este fenómeno é descrito na equação 7.

$$E = R \times I^2 \times \Delta T \quad (7)$$

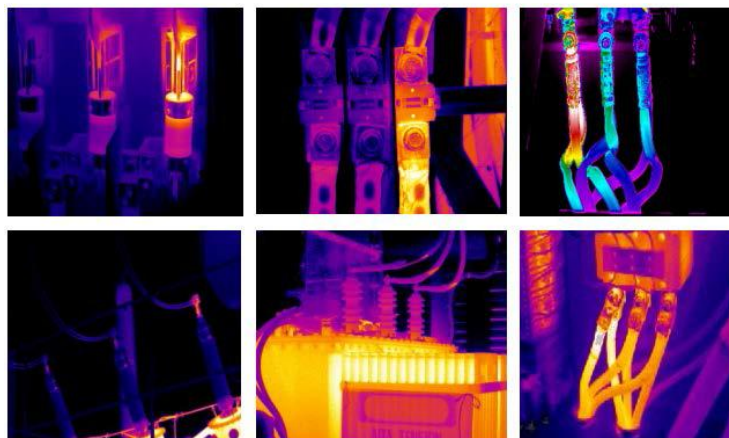


Figura 16. Exemplos da termografia Aplicada a Sistemas Elétricos. Fonte: (Gonçalves, 2011)

6.3.2 Anomalias associadas a Sistemas Elétricos

Atualmente, a maioria das empresas em todo o mundo aplicam a termografia como forma de prevenção e detecção de falhas ou avarias nas redes de energia, tornando-as mais disponíveis e fiáveis.

No âmbito das falhas ou anomalias normalmente encontradas em sistemas elétricos, falhas nos contactos elétricos, curto-circuitos, sobrecargas e desequilíbrio de carga nas fases, são as mais frequentemente encontradas (ver figuras 17,18,19). De acordo com as linhas de investigação da termografia durante o período de 1999-2005 (Martínez & Lagioia, 2007), foi identificado que metade dos problemas no âmbito térmico é causada por maus contactos (Azmat & Turner, 2005). Estes problemas são normalmente associados a folgas, corrosão, ferrugem e oxidação. Estes problemas podem ser facilmente identificados por via de uma CIT, onde o ponto de intensidade térmico é claramente o superior.

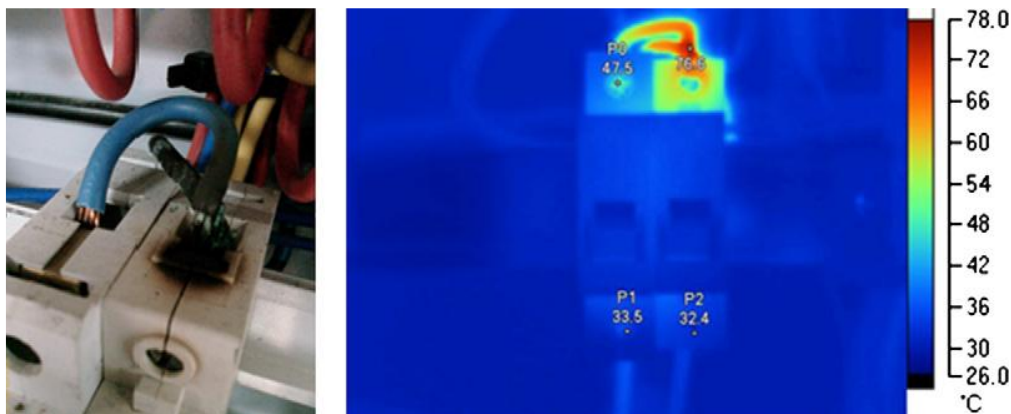


Figura 17. Contacto oxidada de um pequeno disjuntor, do lado direito sua imagem térmica correspondente. Fonte: (Epperly, Heberlein, & Eads, 1997).

A grande maioria dos contactores possuem emissividades muito baixas, normalmente entre 0.1-0.3. Quando estes apresentam indícios de óleo, tons escuros, sobreaquecimento e alguma idade, a emissividade poderá subir até ao valor de 0.97, proporcionando que atinja temperaturas extremamente elevadas (Hellier, 2013).

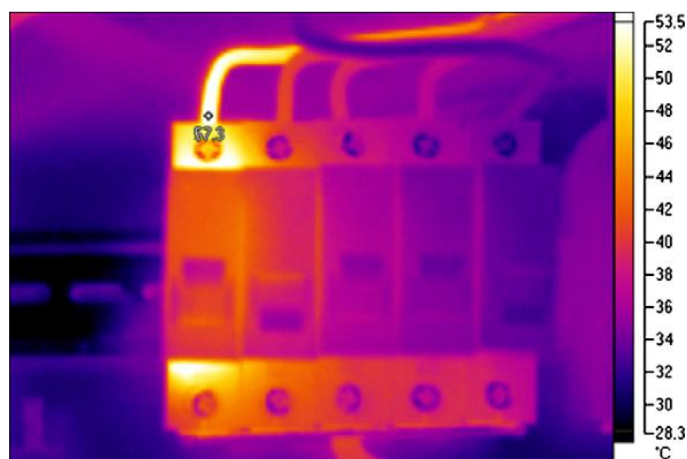


Figura 18. Típico padrão térmico apresentado em disjuntores em sobrecarga. Fonte: (Jadin & Taib, 2012).

Em sistemas elétricos trifásicos o espectro térmico deve apresentar um padrão semelhante ou regular em todas as fases, sem grandes alterações. Esta propriedade vem a desgastar-se ao longo do ciclo do equipamento, uma monitorização adequada com

acompanhamento de condição pode colmatar estas falhas, mantendo, ou até aumentando o ciclo de vida do equipamento.

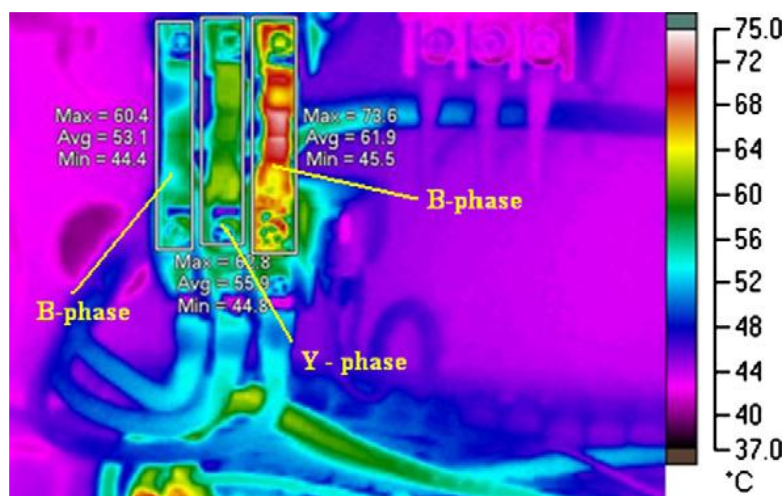


Figura 19. Padrão térmico de desequilíbrio de carga numa das fases. Fonte: (Jadin & Taib, 2012).

Sendo assim, a termografia é uma ferramenta muito útil no diagnóstico da condição de equipamentos elétricos. Os pontos quentes nos equipamentos podem ser facilmente localizados, e os problemas graves podem ser reparados antes de uma quebra definitiva. No entanto, em alguns casos, as imagens provenientes dos ensaios termográficos não podem ser interpretadas diretamente, exceto por um técnico qualificado, pois, algumas características e variáveis da termografia que afetam a medição devem ser bem entendidas (Epperly, Heberlein, & Eads, 1997).

6.3.3 Técnicas de melhoramento de ensaios termográficos

Nos últimos anos tem havido grandes avanços na tecnologia das câmaras de imagem térmica. A maioria das câmaras que encontramos no mercado hoje em dia conseguem distinguir regiões na superfície no campo de 0,1 °C de diferença, ou até menos (Hellier, 2013). Apesar dos grandes avanços na concepção das CIT, associados aos desenvolvimentos no âmbito do processamento de imagem e resolução das câmaras, ainda existem alguns fatores importantes quando efetuamos um ensaio termográfico. Alguns destes fatores podem ser considerados críticos dependentes da situação do ensaio, sejam elas ao ar livre, no subsolo, no mar, etc. Quando uma medição precisa e



rigorosa seja necessária, todos estes aspetos têm de ser antevistos e identificados pelo operador antes que a imagem seja retirada (Snell & Renowden, 2000).

No geral, os fatores que afetam a precisão e validação de um ensaio termográfico podem ser agrupados entre os seguintes: Fator processual, técnico e condições ambientais (Hellier, 2013).

Fator Processual

Este fator retoma apenas ao operador, caso este possua alguma formação no âmbito da termografia. Quanto melhor as qualificações do operador, melhor serão as condições do ensaio, consequentemente um termograma mais preciso com informação fiável.

Fator Técnico

Quanto ao fator técnico, este incide nas características como emissividade, potência de operação⁶ distância do operador-equipamento e o ângulo cujo termograma é retirado (Gasperic, Sprajcar, Bernard, & Glavic, 2007).

Condições Ambientais

Este último fator não deve por forma alguma ignorado, as condições ambientais que rodeiam um ensaio termográfico influenciam bastante o resultado e a precisão da amostra. Dentro deste âmbito há que ter em atenção os seguintes aspetos:

- O aumento da temperatura ambiente irá resultar num aumento da temperatura medida no equipamento em análise;
- Devido à humidade/precipitação a temperatura pode baixar drasticamente, dando origem a uma interpretação não adequada dos dados. Equipamentos cuja temperatura normalmente se encontra baixa irão chegar a níveis extremamente baixos, induzindo a erro o operador;
- Quanto aos meios de convecção, normalmente associados ao vento, atingindo velocidades na gama dos 1-5 mph podem alterar significativamente os efeitos de

⁶ É recomendado que a potência seja pelo menos 40% da carga da instalação



refrigeração em instalações elétricas. Acima dos 5 mph pode resultar num decréscimo acentuado entre equipamento e ambiente, conduzindo a leituras não adequadas dos termogramas;

- Equipamentos expostos à radiação solar, especialmente aqueles com níveis de absorção altos irão funcionar como máscaras, não revelando as pequenas diferenças térmicas das instalações em observação.

No que respeita a uma manutenção por acompanhamento de condição, são pequenas as diferenças térmicas que acompanham o dia-a-dia dos ensaios. Negligenciando os aspetos acima descritos, o operador vai em contra a prática de uma doutrina fiável, não obtendo informação necessária para concluir se de facto o equipamento apresenta indícios de degradação (Snell & Renowden, 2000).

6.3.4 Métodos de medição e análise termográfica

Existem dois métodos de medição de condição térmica dos equipamentos, a análise qualitativa e quantitativa, estas duas abordagens são bastante diferentes no que toca ao objetivo pretendido dos operadores e analistas envolvidos.

Estando perante uma caracterização qualitativa, onde a principal componente é a observação de diferenças de temperatura que indiciem padrões anormais, indicando potenciais anomalias a detetar, o resultado pode ser expresso em duas das seguintes formas: “sim, existe um problema”, ou “não, está a funcionar corretamente”. A análise passa por comparar os padrões térmicos de equipamentos em funcionamento normal, aplicando o critério ΔT (Lindquist, Bertling, & Eriksson, 2005) a partir de uma imagem de referência, consoante uma margem admissível que se aplique, indicando se existe ou não um problema na zona em observação manifestando-se por uma alteração térmica, um exemplo deste método encontra-se descrito na Tabela 2 abaixo descrita. A vantagem da aplicabilidade deste método traduz-se numa forma prática de estabelecer “avaria” ou “não avaria”. Por outro lado para aplicação deste método é necessário um vasto número de dados, no que se traduz num vasto número de termogramas. Por forma a aplicar este método também se torna necessário um ensaio com um rigor acima da média, para que o utilizador possa extrair a informação importante para uma análise posterior (Snell & Renowden, 2000)



Quanto a medição quantitativa, consiste em retirar a temperatura exata dos equipamentos, como também a temperatura ambiente, que será usada como referência. A observação é estabelecida medindo a temperatura absoluta de um equipamento, no entanto, não é fácil determinar a verdadeira temperatura de um equipamento ou componente, torna-se necessário ainda uma maior experiência na correlação das variáveis que influenciam o ensaio termográfico, emissividade, transmissividade e refletividade. O operador tem de organizar todos estes dados antes de partir para o ensaio.

Níveis de prioridade	ΔT entre componentes semelhantes, com o mesmo intervalo de potência	ΔT em relação à temperatura ambiente (°C)	Ação Recomendada
4	1-3	1-10	Possível Anomalia, recomendado monitorizar o equipamento
3	4-15	11-20	Anomalia provável, reparar quando possível
2	-	21-40	Anomalia encontrada. Monitorizar até ações corretivas possam ser aplicadas
1	>15	>40	Elevada diferença de temperatura. Reparar imediatamente

Tabela 2. Esquema utilizado na análise qualitativa, segunda coluna. Como também na análise quantitativa, correspondente na terceira coluna (Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment, Infrasppection Institute, 2008).

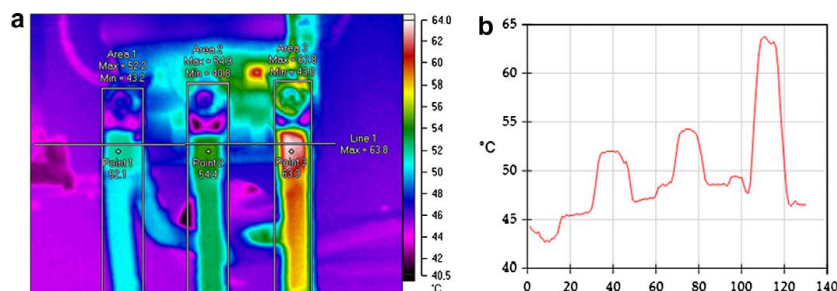


Figura 20. Técnica de extração dos valores de temperatura da imagem (a) Temperaturas encontradas ao longo da linha 1 (b). Aplicando os dois métodos de análise teríamos, para uma análise qualitativa: $\Delta T = T_3 - T_1$; Quanto à análise quantitativa, o cálculo seria o seguinte: $\Delta T = T_3 - T_{ambiente}$. Fonte: (Lindquist, Bertling, & Eriksson, 2005).

6.3.5 Sistema de Diagnóstico Aplicando a Termografia

Atualmente a grande maioria das CIT vêm com o seu próprio software de análise, bem como a capacidade de elaborar relatórios (como o programa FLIR QuickReport 1.2). No entanto, apesar de todas as funcionalidades, o processo de avaliação consome muito tempo, mesmo para um operador experiente, desta forma aplicando um sistema de diagnóstico proporciona uma melhor gestão, e aumento da eficácia na tomada de decisão quanto aos equipamentos em análise, tornando a operação menos subjetiva (Chieh & Yao, 2009).

Os sistemas de diagnóstico para equipamentos elétricos consistem, normalmente de três fases (ver Figura 21). O primeiro passo consiste em encontrar a RDI (região de interesse) na imagem térmica, normalmente associado a segmentação da imagem, sendo o ruído térmico envolvente, na grande parte removidos. Conseguindo extrair a região de interesse, a segunda fase do processo consiste em obter informação fidedigna proveniente da região delimitada. Por último, a fase de classificação, determinar se na zona delimitada contém, ou não, uma possível anomalia, desta forma o analista poderá delegar que ação a tomar (Chieh & Yao, 2009).

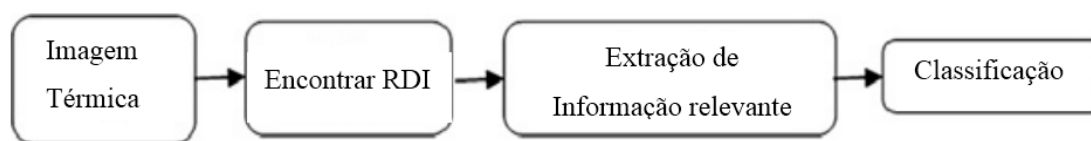


Figura 21. Fases inerentes a um sistema de diagnóstico utilizando a técnica de termografia. Adaptado de: (Jadin & Taib, 2012).

O acompanhamento dos equipamentos, juntamente com o cuidado na arquivagem das imagens, não esquecendo as variáveis de cada ensaio (discutidas anteriormente neste capítulo), resultará numa grande melhora no processo de tomada de decisão, tornando a termografia um processo aplicável, com cada vez menos erros associados. Conseguindo, desta forma, uma redução de custos quanto a reparações, como também a disponibilidade dos meios operacionais, neste caso da MGP.

7 Metodologia

Por forma a desenvolver um método aplicável à MGP de aquisição, arquivação e análise de imagens térmicas, foram desenvolvidos vários projetos para facilitar a sua implementação. Concentrando no que é essencial, este projeto ramificou-se em várias vertentes, desde uma metodologia de como proceder a um ensaio, como à criação de uma base de dados para guardar e gerir os termogramas com a informação suplementar devida, e por fim, a elaboração de uma ferramenta, neste caso um *software* que permite ao utilizador analisar as imagens guardadas, dando este, na medida do possível um feedback quanto ao estado de funcionamento da instalação em análise.

7.1 Ensaio Termográfico

Como discutido no capítulo anteriormente, existem muitas variáveis no procedimento de um ensaio termográfico. Por forma a evitar a corrupção dos dados, principalmente no que toca comparação de imagens, tornou-se necessário o desenvolvimento de uma doutrina para o levantamento das imagens térmicas.

Existindo vários intermediários que retiram estas imagens, os responsáveis pela termografia dos equipamentos têm de objetivar os ensaios, tentando reproduzir todas as variáveis do ensaio anterior. Foi com este propósito que se tornou necessário a implementação de uma FIT⁷ (ficha de trabalho), que tem como objetivo ser o guia para o ensaio termográfico. Assim, independentemente de quem faz o ensaio, garantimos que este foi realizado com o menor índice de erro possível, como também deverá estar de acordo com as imagens retiradas anteriormente ao equipamento em análise. Posto isto, a FIT aponta ao operador às seguintes informações:

- Onde se posicionar;
- Distância ao equipamento;
- Emissividade do equipamento;

⁷ Documento usando no sistema de gestão da manutenção da Marinha Portuguesa, esta contém a informação de quem, como e quando se faz a ação de manutenção a um dado equipamento.



Termografia como Instrumento de Manutenção Condicionada na Marinha

Este guia para o ensaio termográfico também alerta o operador para as seguintes variáveis:

- Registrar temperatura ambiente;
- Humidade relativa;
- Carga mínima da instalação deve estar a 40%;
- Evitar meios de convexão e radiação solar;
- Garantir que a câmara se encontra bem focada.

SGM / SMP		FIT:	
FICHA DE TRABALHO		VERSÃO:	ESTADO:
		PÁG. 1	de 2
PROCEDIMENTO:			
EQUIPAMENTO/ CONJUNTO: (Identificação - Marca/Modelo/Tipo) 1X987 3131000000 QUADRO ELÉTRICO PRINCIPAL			
TÍTULO: RXXXX.YYY – QUADRO ELÉTRICO PRINCIPAL – ROTINA SEMANAL INSPECÇÃO TERMOGRÁFICA		TIPO MANUTENÇÃO: PREDITIVA	
		PERIODICIDADE: SEMANAL	
		MANUTENÇÃO RELACIONADA:	
ELEMENTOS ADICIONAIS: FREM: LIMS:		EXECUTANTE b):	H x h
DOCUMENTAÇÃO DE REFERÊNCIA: (Manuals/ Desenhos/ Etc.)		TOTAL:	
		TEMPO EXECUÇÃO:	
RISCOS E PRECAUÇÕES DE SEGURANÇA: EVITAR ENTRAR EM CONTACTO COM QUADRO			
EQUIPAMENTOS DE TESTE, FERRAMENTAS, SOBRESSALENTES E MATERIAL DE CONSUMO: CÂMARA DE IMAGEM TÉRMICA FLIR i50			
PROCEDIMENTO: <ol style="list-style-type: none">1. Ajustar intervalo de temperatura entre [20;45] °C;2. Verificar se a carga está no mínimo a 40%;3. Se existem meios de convexão, correntes, ventos. Evitar que o equipamento esteja exposto a este agente;4. Atenção à temperatura ambiente e humidade relativa, ajustar na câmara devidamente;5. Distância ao quadro entre 0,5 a 1 metros;6. Garantir que a câmara está bem focada;7. Emissividade ajustada aos 0,75; Depois de ter ajustado a câmara às definições acima descritas, pode proceder ao ensaio. Este consiste em registar três imagens térmicas, a primeira a 0° em relação ao quadro. As outras duas, devem ser tiradas numa posição de modo a estar a 60° a BB e EB do equipamento.			
FIT:	ELABORAÇÃO: DRT3	HOMOLOGAÇÃO: D. NAVIOS	DATA:

Figura 22. Exemplo de uma FIT para ensaios termográficos

Retiradas as imagens, o operador passará para a fase seguinte, guardando as imagens no computador. Nesta etapa, devido às restrições da companhia que fabricou a CIT, é necessário lançar a aplicação que acompanhou a compra da câmara, o programa “FLIR QuickReport 1.2”.

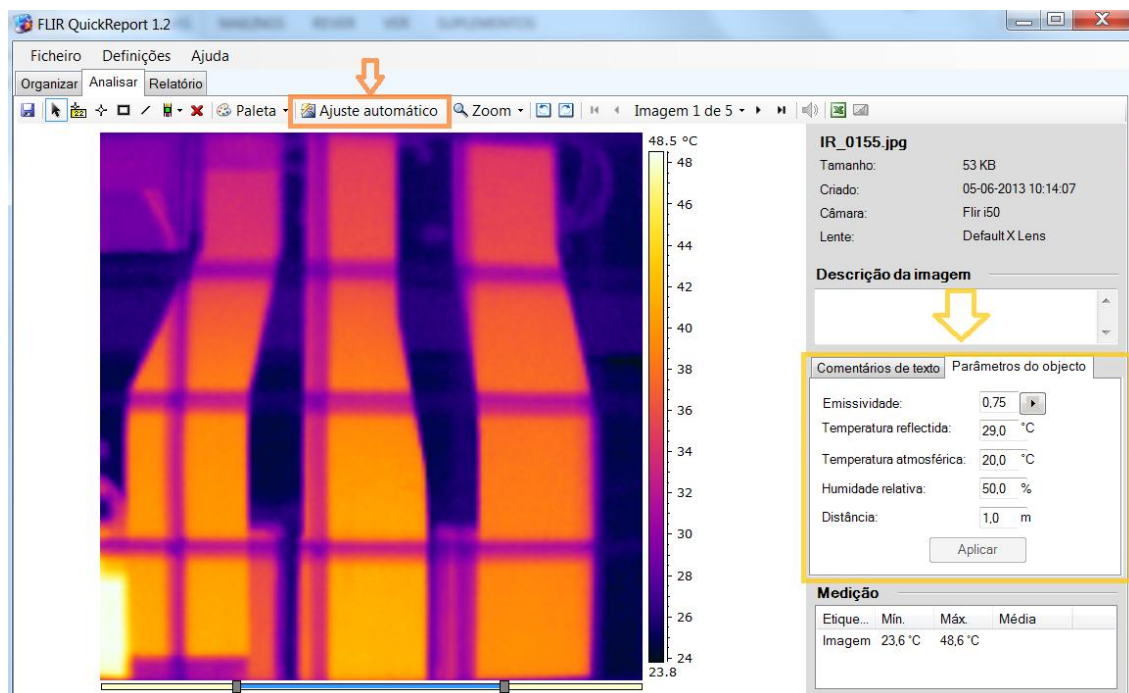


Figura 23. Interface do programa “FLIR QuickReport 1.2” apresentando um termograma do quadro principal do N.R.P Baptista de Andrade, apontando aos aspetos importantes a inserir.

Tendo o termograma escolhido, o utilizador deve inserir todas as variáveis do ensaio na caixa bordada a amarelo, como demonstrado na Figura 23. Bem como o ajuste automático, o botão bordado a uma cor alaranjada, por cima do termograma. Esta operação deve ser executada para todos os termogramas recolhidos, pois estes parâmetros irão alterar significativamente a assinatura térmica da imagem.

Assim, o programa da FLIR fará os ajustes térmicos devidos, passando a ter uma imagem com informação de qualidade, pronta a ser arquivada e posteriormente analisada.



7.2 Base de Dados

Com o objetivo de implementar uma estrutura de arquivagem das imagens térmicas, a base de dados representa um meio muito eficaz para alcançar tal objetivo. É a partir desta que todo o projeto roda em volta, sendo assim, foi necessário criar uma base de dados simples em Microsoft Access 2013™, com a capacidade de guardar a informação útil de cada ensaio. Batizada com o nome de “BDIT” (base de dados de imagens térmicas), contém a seguinte informação associada a cada ensaio:

- Data e hora da Amostra;
- Temperatura máxima verificada;
- Temperatura mínima verificada;
- Temperatura ambiente;
- Humidade relativa;
- Potência de trabalho;
- Agentes exteriores (vento, radiação solar);
- Nome do equipamento;
- Número funcional;
- Navio a qual pertence o equipamento em análise;
- Comentários.

Termograma	
Nome do campo	Tipo de dados
TermogramaID	Numeração automática
Termograma	Objeto OLE
DataAmostra	Data/hora
HoraAmostra	Texto Breve
Tmax	Número
Tmin	Número
Temperatura Ambiente	Número
Humidade Relativa	Número
Agentes exteriores	Texto Breve
Navio	Texto Breve
Equipamento	Texto Breve
Número Funcional	Número
Potência de Trabalho	Número
Comentários	Texto Longo

Figura 24. Tabela principal da base de dados, Microsoft Access 2013™.

Todos estes dados são de input obrigatório (exceto o campo “comentários”), e acompanham sempre uma imagem térmica guardada. É possível a pesquisa da base de dados, bem como inserir uma nova entrada, apenas a partir do programa desenvolvido em Embarcadero RAD Studio XE3™. Sendo assim, o utilizador terá apenas de ter a base de dados no seu computador, acedendo a todos os dados e fazendo as operações pretendidas numa interface muito mais apelativa e “user-friendly”.

7.3. Análise dos Dados

Posteriormente à arquivação dos dados, a fase seguinte recai na análise da informação cuidadosamente guardada. Esta etapa consiste em vários métodos de caracterização de imagens térmicas, bem como a exposição da informação estatística adequada ao objetivo inerente, a comparação de imagens térmicas e a deteção de possíveis avarias.

Para uma melhor interpretação do termograma, foram desenvolvidas ferramentas que permitem ao utilizador visualizar a temperatura máxima, mínima e a média. Assim, o operador poderá ter um resumo inicial do estado do equipamento em análise.

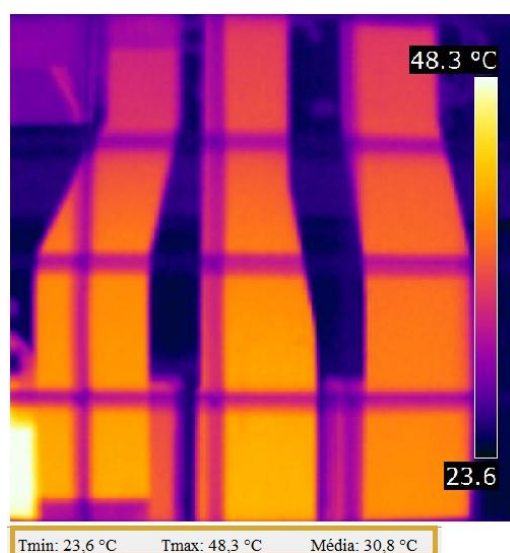


Figura 25. Fases do Quadro Elétrico Principal do N.R.P Baptista de Andrade, apresentando a temperatura mínima, máxima e média por baixo da imagem térmica.



Continuando a análise das imagens térmicas, foram desenvolvidos outros processos de interpretação das imagens com o auxílio de meios estatísticos, como gráficos de frequência de temperaturas, que permite ao utilizador visualizar todas as temperaturas das imagens selecionadas, bem como quantas vezes essas temperaturas se verificam no termograma. Juntamente com o gráfico de frequência de temperaturas, o utilizador poderá também ter acesso ao gráfico de frequência cumulativa das imagens térmicas, proporcionando uma melhor interpretação das imagens e as suas temperaturas, sendo esta uma função empírica, permitirá a implementação de funções adicionais.

7.3.1 Teste de Kolmogorov-Smirnov

O teste de Kolmogorov-Smirnov, em estatística, é utilizado como um teste não paramétrico de igualdade de distribuições de probabilidade com vista a comparar a distribuição de probabilidades de uma amostra com a distribuição de probabilidade de referência (teste KS a uma amostra), ou comparar duas amostras (teste KS a duas amostras). A estatística de Kolmogorov-Smirnov quantifica a distância entre a função de distribuição empírica da amostra e a função de distribuição cumulativa da distribuição de referência (no caso do teste KS para uma amostra) ou entre as duas funções de distribuição empírica das duas amostras (teste KS para duas amostras). Dado que o objetivo da aplicação deste teste é efetuar a comparação entre duas imagens, apenas nos iremos cingir ao segundo caso. A distribuição nula desta estatística é calculada sob a hipótese nula de que as amostras são extraídas da mesma distribuição. Assim, se o resultado da aplicação do teste KS for 0 (zero), a hipótese nula verifica-se, ou seja, as amostras têm distribuições contínuas semelhantes (normalmente com um nível de significância de 5%). Por outro lado, se o resultado do teste for 1, a hipótese alternativa verifica-se, ou seja, rejeita-se a hipótese nula, pelo que, as amostras têm distribuições contínuas diferentes. Este teste permite, portanto, responder à seguinte questão:

- H_0 : As duas imagens vêm da mesma distribuição;
- Vs.
- H_1 : As duas imagens vêm de distribuições contínuas diferentes;



O teste KS para duas amostras é um dos métodos não paramétricos mais úteis, para comparação de duas amostras, uma vez que é sensível a diferenças tanto na localização como na forma das funções empíricas de distribuição cumulativa das duas amostras.

7.3.2 Regressão Linear e Correlação

O conceito de regressão linear e correlação representa um papel de grande importância na análise estatística das amostras, neste caso das imagens térmicas. Quando deparados com mais de uma variável, o estudo incide particularmente em como uma dessas variáveis depende de outras. Este modelo é normalmente aplicado por forma a determinar a função a qual as variáveis estão relacionadas, conseguindo retirar valores esperados de uma variável dependente e um conjunto de variáveis independentes. Sendo assim, métodos como a regressão linear são vulgarmente utilizados para caracterizar o comportamento de uma amostra em função de uma variável, por exemplo o tempo, ou ciclos.

Uma regressão simples toma a forma de uma equação da reta, para as amostras que iremos analisar, esta encontra-se adequada às necessidades, podendo adotar outras formas como exponencial, logarítmica, etc. As variáveis desta equação são retiradas das amostras em análise, como verificado na equação 6:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (8)$$

Onde β_0 e β_1 são definidos pelas seguintes equações 9 e 10:

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (9)$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (10)$$

A regressão possui um erro associado, tal fenómeno tem efeito devido à dispersão dos valores da amostra. Este erro pode ser calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$R^2 = \frac{\beta_0 \sum_{i=1}^n y_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n y_i x_i - n \bar{y}^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2} \quad (11)$$

x_i	Somatório dos valores da Abcissa da amostra.
y_i	Somatório dos valores da ordenada da amostra.
x_i^2	Quadrado do somatório dos valores da Abcissa da amostra.
y_i^2	Quadrado do somatório dos valores da ordenada da amostra.
$y_i x_i$	Somatório dos valores da ordenada multiplicando com os da abcissa.
\bar{x}	Média dos valores da abcissa, $\bar{x} = x_i/n$.
\bar{y}	Média dos valores da abcissa, $\bar{y} = y_i/n$.
n	Número total de amostras.
R^2	Coeficiente de determinação, varia entre $[0,1]$.
R	Coeficiente de correlação simples, $R = \pm\sqrt{R^2}$. Podendo variar entre $[-1,1]$.

Tabela 3. Variáveis referentes às equações 8, 9, 10 e 11.

O coeficiente de determinação (R^2) possibilita uma medida da proporção da variação total, para valores próximos de um significa que grande parte da variação dos valores do eixo das ordenadas é explicada linearmente pela variável independente. Caso valor se aproxime de zero significa que grande parte da variação não é explicada linearmente pela variável independente.

O coeficiente de correlação (R) é utilizado como uma medida do grau de relacionamento linear entre as duas variáveis, nos eixos de abcissa e ordenada. Para um valor igual a 1, indica a existência de uma relação linear perfeita e positiva entre X e Y. Valores iguais a zero retomam para uma inexistência de qualquer relação ou tendência linear entre X e Y. Quando o valor é negativo, este indica uma relação linear perfeita e negativa entre as duas variáveis. Para valores superiores a zero indicia que as variáveis tendem a variar no mesmo sentido, o inverso verifica-se para valores inferiores a zero.



7.4 Programa Desenvolvido

O desenvolvimento da aplicação informática surgiu como a necessidade de reduzir a subjetividade do operador quanto à análise dos termogramas, sendo este um dos objetivos do estudo em questão.

No início do projeto, talvez a fase mais importante de todo o processo, residuiu na escolha da ferramenta e qual linguagem de programação que iria utilizar. Tendo sido deixado ao critério do autor, tornou-se de extrema importância efetuar a escolha acertada logo à partida, por forma a evitar futuras complicações, podendo o projeto ficar inviabilizado por questões temporais. Após uma análise da relação funcionalidades a implementar, potencialidades e facilidade de aprendizagem, chegou-se à conclusão que o Delphi XE3 poderia ser a ferramenta ideal para o projeto. Devido às suas várias funcionalidades ADO⁸, esta ferramenta apresentou à partida inúmeras possibilidades de interação com a base de dados criada, como também um vasto número de bibliotecas, editores de texto e inúmeros botões que facilitaram a criação de um atrativo e “user-friendly” GUI⁹, disponibilizando ao utilizador uma ferramenta de fácil interação.

Após reunidas as condições necessárias, deu-se início à elaboração do programa, embora que, nesta fase inicial reverteu apenas a aprendizagem, pois apesar de algum conhecimento base na linguagem de programação usada, muitas funcionalidades eram desconhecidas. Após o período de adaptação, procedeu-se à separação de funcionalidades em vários formulários, sendo estes cinco. O primeiro como uma interface de consulta da base de dados, o segundo para guardar novas imagens juntamente com a informação adicional, o terceiro como um meio de estudo de uma dada imagem térmica guardada, o quarto formulário possibilita ao utilizador a comparação de imagens, bem como a comparação de secções, por último, o quinto formulário dá ao utilizador um resumo de uma dada região em vários termogramas provenientes do mesmo equipamento ao longo do tempo.

Assim surge o SAAIT (Sistema de Armazenamento e Análise de Imagens Térmicas), que tem a nobre missão de facilitar o armazenamento das imagens térmicas,

⁸ ActiveX Data Objects, mecanismo apresentado pela Microsoft em 1996, onde os programas utilizam troca de informação com bases de dados.

⁹ Graphical User Interface é um tipo de interface que permite ao utilizador interagir apenas com imagens e botões ao invés de comandos de texto.

bem como a sua análise ao longo do tempo, ajudando nesta forma a MGP na monitorização dos equipamentos, bem como a deteção de possíveis anomalias.

7.4.1 Formulários

Passando para uma vertente mais prática, irei explicar detalhadamente cada formulário, descrevendo o seu modo de funcionamento e como proceder às funções inerentes a cada um.

Interface Inicial

A interface inicial, ou formulário de Login, apresentado na Figura 26 abaixo descrita, é pelo que o nome indica, a primeira interação do programa com o utilizador. Apresenta o título da aplicação, bem com o logotipo de identificação criado, juntamente, os vários logotipos e símbolos das parcerias envolvidas na criação do programa. Mais importante ainda, funciona como uma porta de acesso aos outros formulários, podendo o utilizador navegar no qual pretende.



Figura 26. Interface inicial do programa, porta de acesso dos vários formulários na aplicação.

Formulário de Consulta

O primeiro formulário de interação com o utilizador é apresentado como o de consulta, neste formulário o utilizador pode consultar a base de dados de imagens, tendo toda a informação associada a cada imagem também disponível. Neste formulário também é possível aceder qualquer dos outros formulários criados.

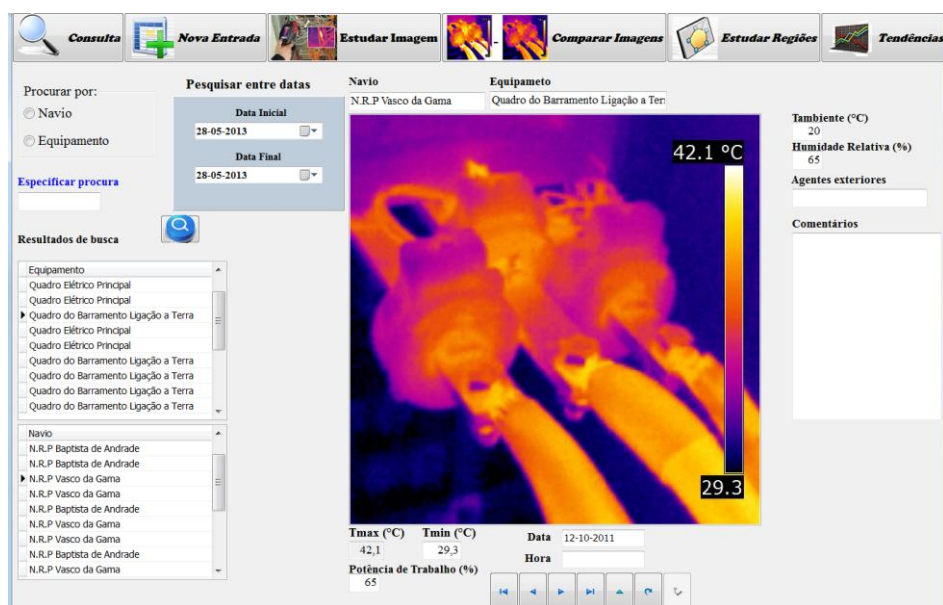


Figura 27. Formulário Consulta.

Este separador possui uma mais-valia ao utilizador no que toca a filtrar resultados pretendidos. Caso o utilizador queira efetuar uma pesquisa dinâmica da base de dados, poderá fazê-lo inserindo qual o critério de escolha (neste caso, equipamento ou navio), e o programa irá filtrar os resultados apenas para a escolha digitada no campo em branco (ver figura 27). Caso o utilizador queira consultar imagens térmicas entre datas específicas, terá apenas de escolher entre que datas pretende consultar, o programa.



Figura 28. Funcionalidade do formulário consulta para filtrar resultados.

A escolha dinâmica de filtragem da base de dados é feita pelo grupo apresentado à esquerda da Figura 2828, o utilizador terá de seleccionar se pretende efetuar uma pesquisa por nome de navio, ou por nome de equipamento, digitando qual o nome que procura na caixa de texto em branco. Para filtrar entre datas, o utilizador terá de seleccionar a data inicial e final que pretende no componente de calendário à direita Figura 28, tendo as datas seleccionadas, deverá pressionar o botão situado em baixo destes de modo a filtrar os valores.

Formulário Nova Entrada

Mantendo a funcionalidade de navegar para qualquer dos outros formulários, o presente separador tem como objetivo guardar novas entradas na base de dados, acrescentando uma nova linha na BDIT. O utilizador deve preencher todos os campos em branco, se não o fizer o programa chamará à atenção que esses parâmetros são de preenchimento obrigatório, não acrescentando nada na base de dados. O separador faz também a referência à FIT criada, de modo a apontar ao utilizador alguma dúvida quanto ao ensaio que deseja guardar.

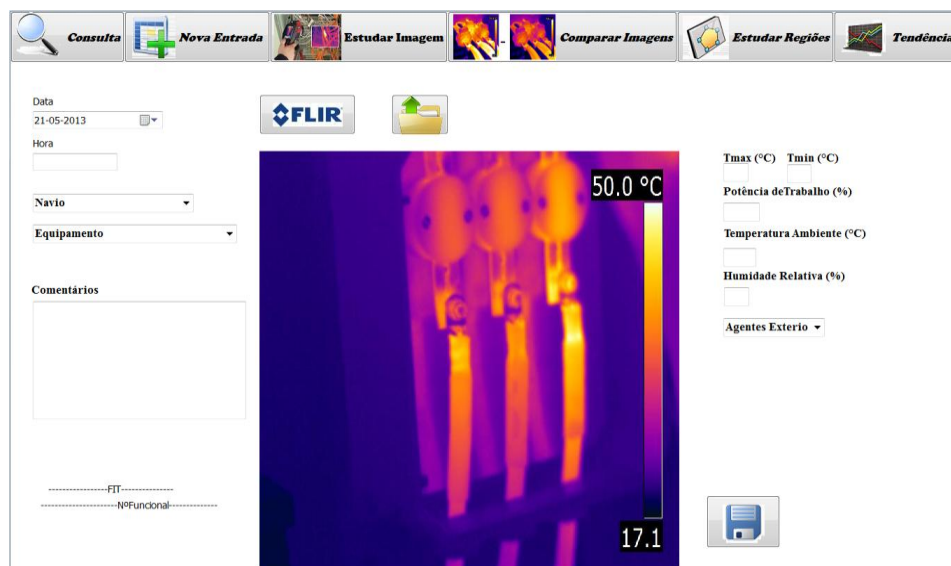


Figura 29. Separador Nova Entrada.

Neste formulário o utilizador deve seguir certos passos, por forma a guardar devidamente uma nova imagem na base de dados:

1. Ao retirar a imagem com a CIT, o utilizador irá conectá-la ao computador (ou inserir o cartão de memória). Irá deparar com uma imagem de resolução 240x240 com muito texto associado, como exemplificado na Figura 30, terá então de abrir o programa da FLIR “QuickReport 1.2” (inserindo todos os parâmetros discutidos anteriormente neste capítulo). Com o auxílio deste programa, a imagem passará a ter uma resolução de 600x600, que ajudará bastante na visualização adequada da imagem, bem como desenvolver funcionalidades de processamento de imagem;

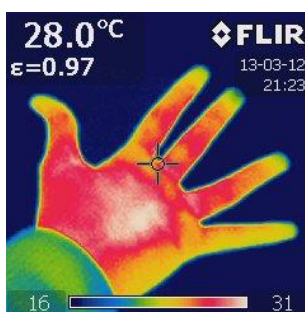


Figura 30. Imagem retirada diretamente da CIT, apresentando uma resolução de 240x240.

2. Ao passar a imagem para a resolução adequada, o utilizador irá procura-la no computador onde se encontra a trabalhar, preenchendo todas as variáveis exigidas pelo programa;



Figura 31. Botões encontrados no separador Nova Entrada, o botão à esquerda lança internamente o programa FLIR QuickReport 1.2. O botão que é apresentado à direita abre um FileDialog, por forma ao utilizador procurar a imagem que pretende guardar.

3. Após todos os dados estarem devidamente preenchidos, o utilizador deverá guardar todo este processo, acrescentando uma nova linha da base de dados.



Figura 32. Botão guardar nova entrada.

Formulário Estudar Imagem

O presente formulário visa ao estudo das imagens, mantendo funcionalidades como a pesquisa de dados digitando numa editora de texto, bem como pesquisa entre datas, podendo assim o utilizador navegar livremente pela base de dados.

Todos os pixels das imagens apresentadas neste formulário possuem o seu valor nominal em temperatura, sendo estas imagens de resolução 600x600, obtemos assim uma tabela com 600 linhas e 600 colunas de temperaturas pontuais de cada imagem. Desta forma a aplicação pode disponibilizar ao utilizador vários parâmetros estatísticos como a temperatura máxima, mínima e média. Podendo também apresentar graficamente a distribuição de temperaturas e a distribuição cumulativa.



De forma a eliminar o ruído inerente às imagens térmicas, foi desenvolvido um método de segmentação das imagens, deste forma o utilizador pode definir regiões de interesse livremente a partir de pontos marcados na imagem. Estas imagens segmentadas são guardadas em matrizes, onde o utilizador poderá aceder a toda a informação, posteriormente a aplicação encontra-se preparada para mostrar graficamente a distribuição das temperaturas e a distribuição cumulativa anteriormente discutidas, bem como a média da região segmentada.

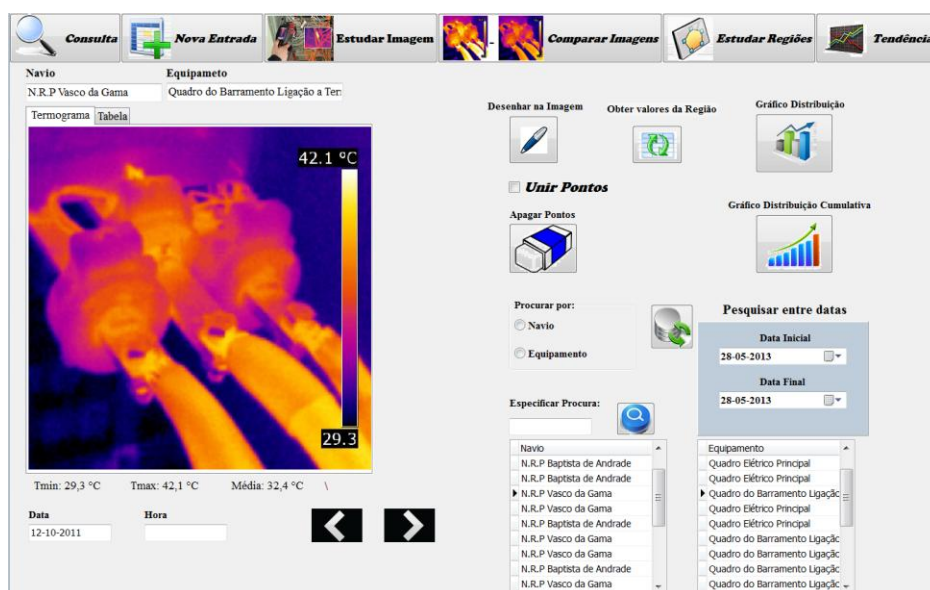


Figura 33. Formulário Estudar Imagem.

Termograma	Tabela							
31,3	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31
31,3	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31
31,4	31,4	31,4	31,4	31,5	31,4	31,4	31,4	31
31,4	31,4	31,5	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31
31,4	31,3	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31
31,3	31,4	31,4	31,3	31,3	31,4	31,4	31,4	31
31,3	31,4	31,3	31,4	31,3	31,3	31,4	31,4	31
31,4	31,3	31,3	31,4	31,4	31,3	31,4	31,4	31
31,4	31,4	31,3	31,3	31,3	31,3	31,4	31,4	31
31,3	31,3	31,4	31,4	31,3	31,4	31,4	31,4	31
31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,5	31,5	31
31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,5	31,5	31,5	31
31,5	31,4	31,4	31,5	31,4	31,5	31,5	31,5	31
31,4	31,5	31,4	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31
31,5	31,4	31,4	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31
31,4	31,4	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31
31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,7	31,7	32

Tmin: 29,3 °C Tmax: 42,1 °C Média: 32,4 °C

Figura 34. Tabela do formulário Estudar Imagens, apresentando todos os valores de temperatura da imagem em análise.



Procurar por:

☐ Navio

☐ Equipamento

Especificar Procura:

Navio

- N.R.P Baptista de Andrade
- N.R.P Baptista de Andrade
- N.R.P Vasco da Gama
- N.R.P Vasco da Gama
- N.R.P Baptista de Andrade
- N.R.P Vasco da Gama
- N.R.P Vasco da Gama
- N.R.P Baptista de Andrade
- N.R.P Vasco da Gama

Pesquisar entre datas

Data Inicial: 28-05-2013

Data Final: 28-05-2013

Equipamento

- Quadro Elétrico Principal
- Quadro Elétrico Principal
- Quadro do Barramento Ligaçã
- Quadro Elétrico Principal
- Quadro Elétrico Principal
- Quadro do Barramento Ligaçã
- Quadro do Barramento Ligaçã
- Quadro do Barramento Ligaçã
- Quadro do Barramento Ligaçã

Figura 35. Pesquisa da base de dados no formulário Estudar Imagens.



Figura 36. Botões para mostrar os respetivos gráficos no formulário Estudar Imagens.

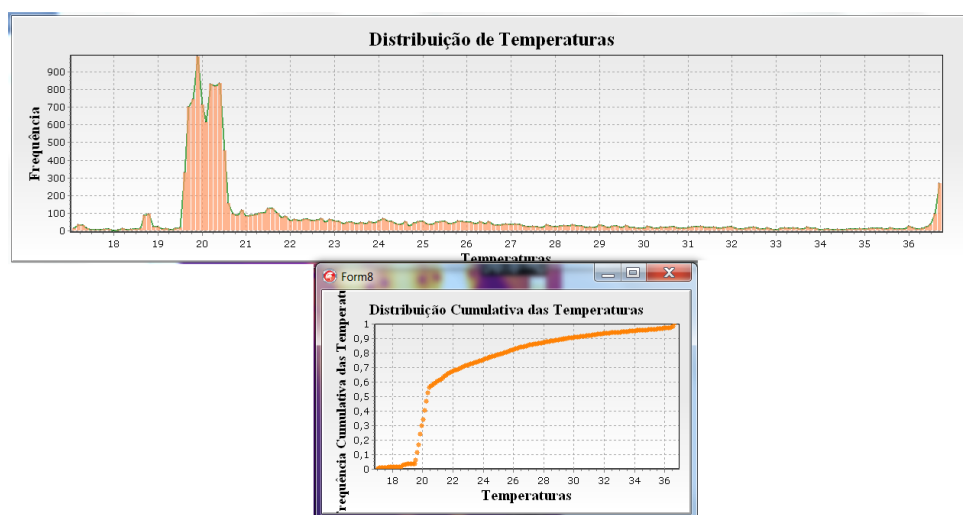


Figura 37. Gráficos Distribuição de temperaturas e distribuição cumulativa de uma dada imagem térmica no formulário Estudar Imagens. Estes gráficos também contemplam uma função zoom, para melhor observação dos valores.

Para segmentar a imagem e obter os valores da região desenhada, o utilizador deve seguir os seguintes passos (Figura 38):

1. Por forma a dar a entender ao programa que pretende segmentar a imagem, deve primeiro clicar no botão “Desenhar na Imagem”;
2. De seguida poderá desenhar um conjunto de pontos na imagem, delimitando assim a região que pretende analisar;
3. Após ter delimitado a região como pretende, pode visualiza-la clicando no botão “Unir Pontos”. Para segmentar os valores da tabela para apenas a região desenhada deve clicar no botão “Obter valores da Região”, em seguida a aplicação irá dar a média de temperatura da área segmentada;
4. Se eventualmente houve um engano ao desenhar a área, ou esta não é do agrado do utilizador é possível apagar os pontos desenhados com o botão “apagar pontos”.



Figura 38. Botões para operações de segmentação de imagem do formulário Estudar Imagens.

Formulário Comparar Imagens

O desenvolvimento de uma ferramenta de comparação de imagens térmicas apresenta sem dúvida uma mais-valia ao utilizador, conseguindo este obter informação quanto ao estado de funcionamento dos equipamentos em análise. É precisamente nesta vertente que o formulário “Comparar Imagens” se encontra inserido.

Mantendo todas as funcionalidades do formulário “Estudar Imagens”, no que diz respeito à filtragem de resultados na base de dados, tabela de temperaturas, temperatura mínima, máxima, média, segmentar a imagem e os gráficos distribuição e cumulativa. O presente formulário permite ao utilizador não só observar as diferenças entre cada imagem, com também efetuar o teste de Kolmogorov-Smirnov para toda a imagem, ou para uma determinada região segmentada pelo utilizador. Conseguindo obter a informação, por uma forma estatística e não subjetiva se as imagens apresentam, ou não diferenças significativas.

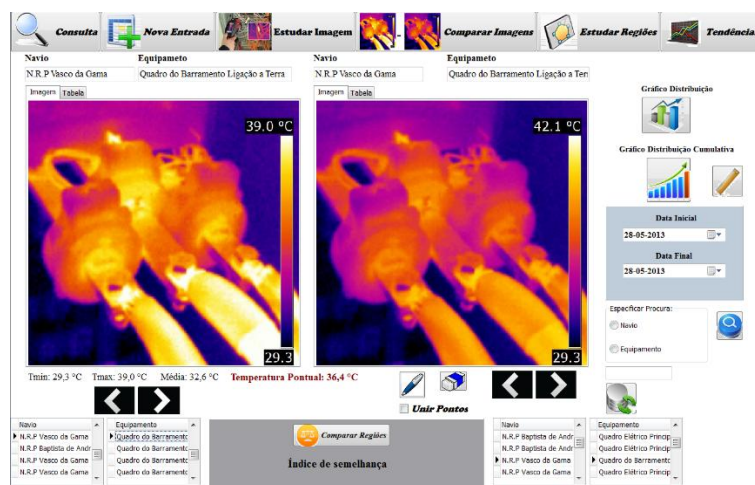


Figura 39. Formulário Comparar Imagens.

Ao segmentar a primeira imagem (ver Figura 40), o programa guarda as coordenadas dos pontos e define em simultâneo a mesma região na segunda imagem, o que torna para o operador a comparação muito simples e fácil de aplicar.

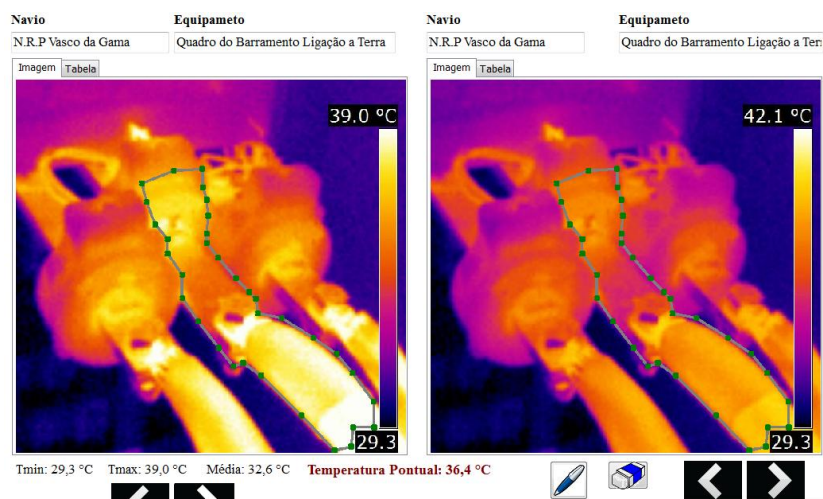


Figura 40. Imagens do mesmo equipamento, segmentadas exatamente na mesma região.

Ao segmentar a região pretendida, o utilizador pode obter os valores da média de cada região, apenas pressionando no botão “Comparar Imagens” apresentado na Figura 41.



Figura 41. Painel no formulário “Comparar Imagens” que dá ao utilizador a média de cada região segmentada.

Por forma ao utilizador visualizar a frequência de temperaturas de cada imagem, o programa está elaborada para mostrar ambos os gráficos ao utilizador, bem como possíveis regiões segmentadas, a Figura 42 retirada do programa em execução servirá como exemplo.

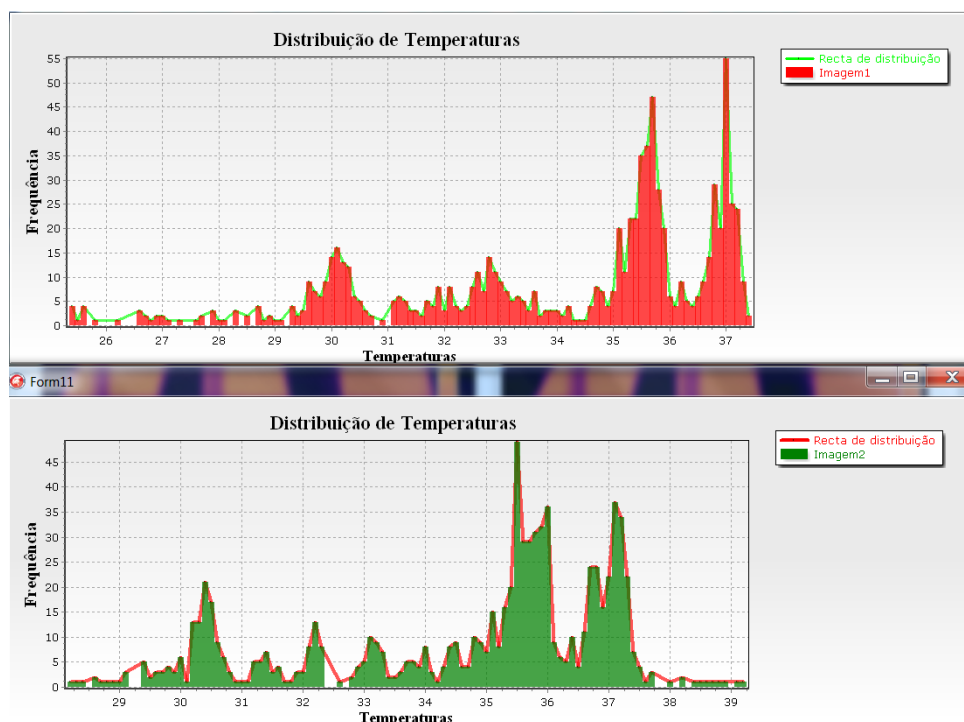


Figura 42. Gráficos distribuição de temperaturas de duas imagens segmentadas.

Sendo o objetivo da criação deste formulário a comparação de imagens, foi aplicado o método estatístico discutido anteriormente neste capítulo (Teste KS para duas amostras), por forma a ajudar o utilizador, aplicando um método científico não subjetivo, na identificação de regiões que apresentam distribuições significativamente diferentes, podendo assim, determinar se na zona delimitada a existência de possíveis anomalias.

Tendo as duas distribuições cumulativas das regiões, a aplicação está preparada para encontrar a maior distância entre dois pontos, utilizando a equação 12 abaixo descrita:

$$y = (x - x_1) \times \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} + y_1 \quad (12)$$

Encontrando a maior distância entre os pontos de ambas as distribuições, podemos aplicar o teste KS, por forma a verificar se as regiões provêm da mesma distribuição, ou não.

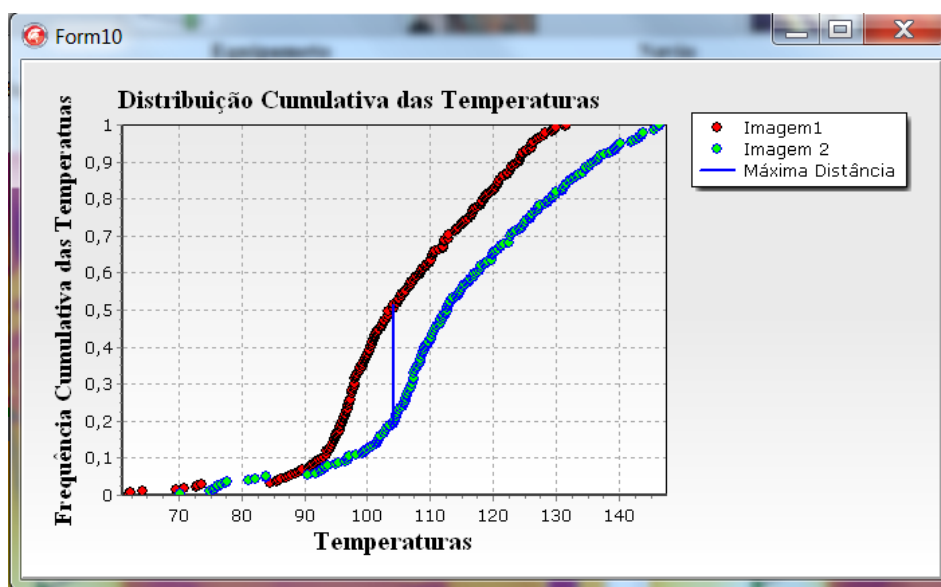


Figura 43. Teste Kolmogorov-Smirnov para duas amostras.



Aplicando o teste de KS para duas amostras, só existem dois possíveis resultados, as amostras provêm da mesma distribuição, ou não. A aplicação dá a resposta ao utilizador apresentando caixas de texto, sendo elas apresentadas na Figura 44 abaixo descrita.

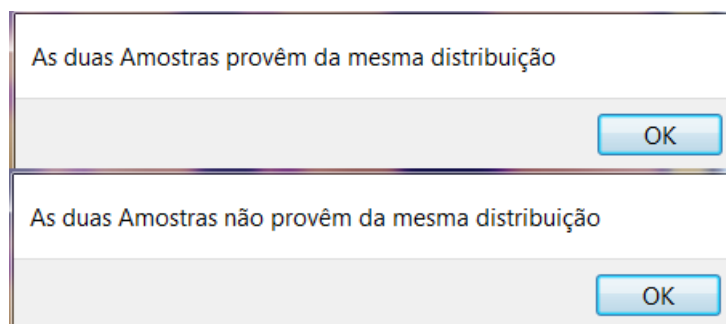


Figura 44. Resultado na aplicação do teste KS para duas amostras.

Formulário Tendências

Passando agora a descrever o último formulário da aplicação informática, o formulário “Tendências”, este separador foi criado com o objetivo de disponibilizar ao utilizador a informação de um dado equipamento (escolhido ao critério do operador) ao longo do tempo. Mantendo funções de filtragem das imagens dos formulários “Estudar Imagens” e “Comparar Imagens”, bem como a capacidade de definir regiões, o presente separador contempla inúmeras funcionalidades quanto à visualização temporal do estado de funcionamento. Tendo a capacidade de expor informação ao utilizador de uma dada região de um equipamento ao longo do tempo.

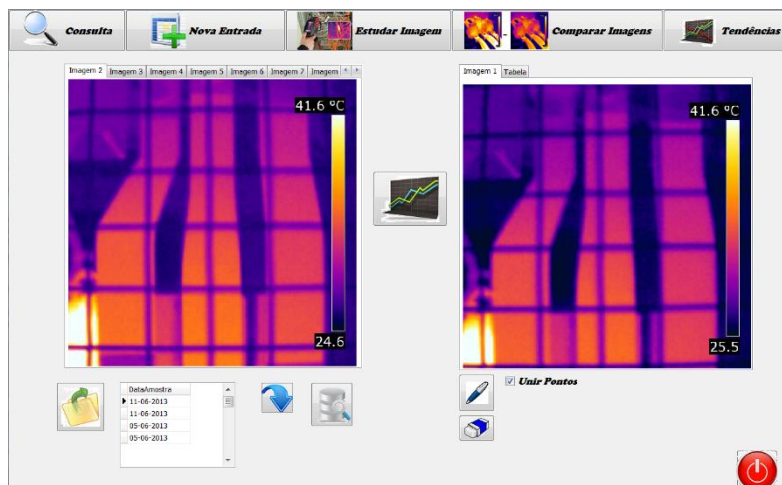


Figura 45. Separador “Tendências”.

A utilização deste formulário processa-se de uma maneira muito simples, o operador possui a capacidade de filtrar resultados da base de dados, escolhendo qual o equipamento que quer analisar, de que navio, ou ate em que datas.



Figura 46. Botão no formulário “Tendências”, irá disponibilizar um painel de filtragem de resultados.

Figura 47. Painel de filtragem de resultados, semelhante aos formulários anteriores.

Depois de selecionados os termogramas pretendidos para a análise tendencial, o utilizador terá de os ordenar por data, assim as imagens ficarão ordenadas do mais recente para o mais antigo.

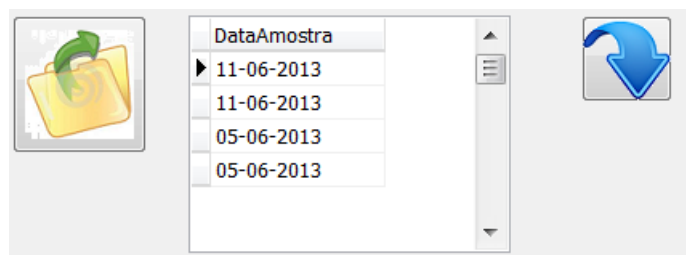


Figura 48. O botão à direita ordena as imagens por data mais recente, o botão à esquerda carrega as imagens para os vários componentes de imagens prontos a receber. A caixa no centro da figura corresponde a quantas imagens resultaram da filtragem que o utilizador inseriu.

Inseridas as imagens que se pretendem analisar, o utilizador dispõe das ferramentas semelhantes ao formulário “Comparar Imagens” no que toca a segmentar regiões na imagem, por forma a obter a tendência da respetiva região (caso seja do mesmo equipamento) ao longo do tempo.

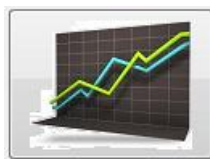


Figura 49. Botão que proporciona ao utilizador toda a informação tendencial das imagens em análise.

A aplicação encontra-se preparada para disponibilizar ao utilizador a média da região segmentada em cada imagem, bem como o gráfico da tendência dessa mesma região ao longo do tempo, apresentando também a respetiva reta de regressão linear, que define a variação da média das temperaturas ao longo das várias datas que as amostras foram retiradas.

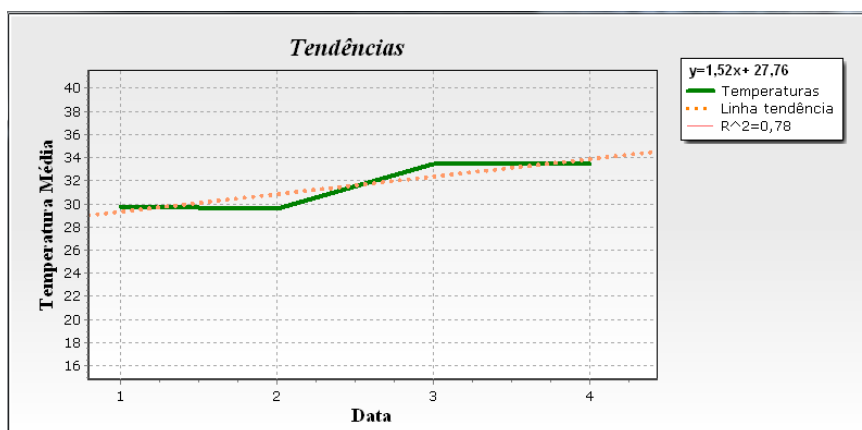


Figura 50. Gráfico tendência da região selecionada, disponibiliza a reta das variações na média de temperaturas da região (eixo dos y) ao longo do tempo (eixo dos x), bem como a reta de regressão e a respetiva função característica para as amostras.

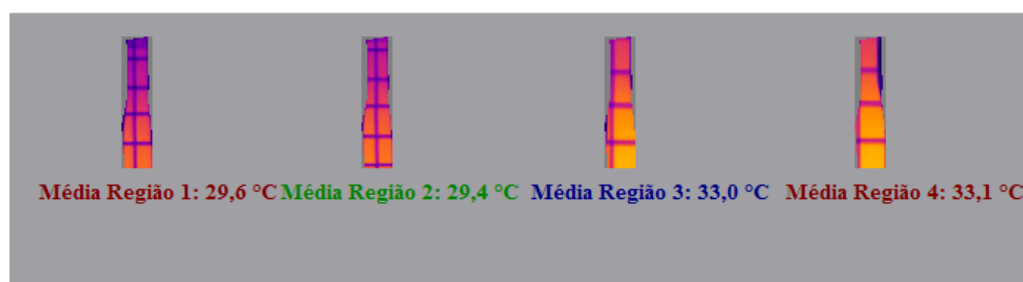


Figura 51. Painel no formulário "Tendências" que apresenta as várias regiões segmentadas das imagens, bem como a informação da média dessas mesmas regiões.

Sendo as imagens térmicas do mesmo equipamento, a aplicação proporciona a análise da mesma região em vários termogramas retiradas em instantes distintos. Desta forma, conseguindo visualizar o padrão térmico (em média) do mesmo equipamento ao longo do tempo, determinando a sua tendência, observando claras evidências se este está a melhorar, ou a piorar entre os vários períodos que foram retiradas as amostras.



7.5 Resumo da Metodologia Desenvolvida

Em produção.



8 Recolha e Análise de Dados

Em produção.



9 Resultados do Estudo e Validação

Em produção.



10 Discussão

Em produção.



11 Conclusões

Em produção.



12 Trabalhos Futuros

Por escrever.



13 Bibliografia

- Álvares, R. C. (Outubro de 2008). *Diagnóstico de Falhas em Pára-raios utilizando a Termografia*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.
- Azmat, Z., & Turner, D. J. (2005). *Infrared thermography and its role in rural utility environment*. Proceedings of the Rural Electric Power Conference, (pp. B2/1-B2/4). San Antonio, EUA.
- Barreira, E. S. (Março de 2004). *Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Çengel, Y. A. (2005). *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences 2nd Ed*. Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill.
- Chieh, Y. C., & Yao, L. (2009). *Automatic diagnostic system of electrical equipment using infrared thermography*. International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, (pp. 155-160). Malaca, Malásia.
- Damas, L. (2005). *SQL: Structed Query Language*. Portugal: Lousã: FCA - Editora de Informática.
- Epperly, R., Heberlein, G., & Eads, L. (1997). *A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography*. Petroleum and Chemical Industry Conference, (pp. 59-68). Chicago, EUA.
- FLIR Systems. (2010). *User's Manual, FLIR bxx Series, FLIR ixx Series*. FLIR Systems.
- Gasperic, S., Sprajcar, B., Bernard, R., & Glavic, R. (2007). *The analysis of thermographic reports with emphasis on emissivity coefficient determination of bare conductors and joints*. Proceedings of International Conference on Electricity Distribution, (pp. 1-4). Viena, Áustria.
- Gonçalves, T. M. (Junho de 2011). *Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com recurso a Termografia*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Hayter, A. (2012). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists 4th Ed*. Boston, EUA: Brooks/Cole, Cengage Learning.



- Hellier, C. (2013). *Handbook of Nondestructive Evaluation, 2nd Ed.* EUA: McGraw-Hill Professional.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* EUA: John Wily & Sons, Inc.
- Jadin, M. S., & Taib, S. (2012). *Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using thermography.* Faculdade de Electricidade e Engenharia Electrónica. Pahang, Malásia.
- Lizak, F., & Kolcun, M. (2008). *Improving reliability and decreasing losses of electrical systems with infrared thermography.* Universidade Técnica de Kosice, Eslováquia.
- Marinha. (12 de Novembro de 1998). ILDINAV 802. *Manual do Sistema da Gestão da Manutenção e do Sub-sistema de Manutenção Planeada.* Lisboa.
- Martínez, J., & Lagioia, R. (2007). *Experience performing infrared thermography in the maintenance of a distribution utility.* International Conference on Electricity Distribution, (pp. 1-4). Viena, Áustria.
- Mobley, K. (2002). *An introduction to Predictive Maintenance 2nd Ed.* Woburn, MA (USA): Butterworth Heinemann.
- Pedrini, H., & Schwartz, W. R. (2006). *Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações.* São Paulo, Brasil: Thomson.
- Rahmani, A., Haddadnia, J., & Seryasat, O. (2010). *Intelligent fault detection of electrical equipment in ground substations using thermo vision technique.* International Conference on Mechanical and Electronics Engineering, (pp. V2-150-V2-154). Tóquio, Japão.
- Santana, L. (Julho de 2008). *Diagnóstico de Avarias Através da Técnica de Termografia com Recurso a Análise de Dados Multivariados.* Dissertação de Mestrado. Escola Naval, Departamento de Engenheiros Navais-Ramo de Mecânica., Lisboa, Portugal.
- Sir William Herschel Society. (2000). Obtido em 17 de Junho de 2013, de <http://www.williamherschel.org.uk/index.html>
- Snell, J., & Renowden, J. (2000). *Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines.* International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, (pp. 135-144). Montreal, Canadá.



Vasconcellos, C. A. (2006). *Radiação de Corpo Negro*. Universidade Federal do Rio Grande, Brasil. Obtido em 29 de Abril de 2013, de <http://www.cesarzen.com/FIS1056Lista2.pdf>